

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté des sciences de l'ingénieur

MEMOIRE DE MAGISTERE

Génie Rural

Option : Sciences de l'eau

**IMPACT DU TRANSPORT SOLIDE SUR LA MOBILISATION
DES EAUX SUPERFICIELLES DE LA NOUVELLE VILLE
DE BOUGHZOUL (MEDEA)**

Par

Rachid CHELLALI

Devant le jury composé de :

M. BESSENASSE	Maître de conférences, Université de Blida	Président
S.A HAMMOUDI	Professeur, Université de Chlef	Examineur
M. HABI	Maître de conférences, Université de Tlemcen	Examineur
B. REMINI	Professeur, Université de Blida	Rapporteur

Blida, juin 2008

RESUME

En Algérie l'érosion ravinante a déplacé 90 à 300 t/ha.an de sédiments, en fonction du volume des pluies, de la vitesse d'altération des versants, de la pente et de la couverture de la surface des sols. D'après Roose les observations des montagnes méditerranéennes du nord ouest algérien montrent une érosion en nappe modeste, même sur forte pente, tandis que le ravinement et les mouvements de masse mobilisent des volumes considérables de terre qui trouveront leur chemin vers les aménagements hydrauliques situés en aval.

L'étude du transport solide dans le bassin versant Chellif amont de Boughzoul, a révélé l'existence d'une dégradation spécifique de 34.27 t/km².an, ce qui se traduit par un important apport solide annuel au niveau du barrage de Boughzoul avoisinant les 673000 tonnes de sédiments.

Compte tenu de l'ampleur du phénomène et du taux alarmant d'envasement du barrage de Boughzoul (63%), appelé à jouer un rôle structurant dans l'édification de la ville-lac, des mesures préventives ont été préconisées pour lutter contre cet aléa aux conséquences pesantes sur la survie du projet de la nouvelle ville.

Entre autres, la lutte mécanique par des seuils bien conçus, constitue une alternative fort appréciable, conciliant le coût et l'efficacité, combinée à des mesures biologiques bien adaptées et à forte valeur ajoutée et envisagée dans une approche concertée avec un monde rural plutôt réservé, conduirait à circonscrire l'élan du phénomène et sauvegarder une ressource de plus en plus chétive, laissée en proie à différentes agressions aussi bien climatique qu'anthropique de surcroît.

Mots clés :

Erosion ravinante - Bassin versant – Transport solide - Envasement

ملخص

ينقل الانجراف في الجزائر من 90 إلى 300 طن/هكتار في العام من المواد الصلبة و ذلك حسب كمية الأمطار، سرعة تآكل المساحات، الانحدار والغطاء النباتي. تظهر ملاحظات 'روز' للجبال المتوسطة للشمال الغربي الجزائري انجراف سطحي متوسط، رغم حدة الانحدار بينما اخوار التاكل و تحرك كتل الطمي يحرران أحجام كبيرة من التربة التي توصل طريقها لمنشآت الري المتواجدة في الخلف.

دراسة نقل المواد الصلبة على مستوى المحيط المائي الشلف قبل بوغزول تكشف لنا عن حدة الانجراف المتمثلة في 34.27 ط /كلم² في العام مما ادى الى ارتفاع نسبة التوحد على مستوى سد بوغزول و المقدرة ب 673000 طن في العام.

نظرا لحدة الظاهرة و معدل التوحد (63 %) لسد بوغزول الذي يناط بلعب دورا حيويا هام في إنشاء المدينة المائية، تمت الإشارة إلى إجراءات وقائية لمحاربة الظاهرة ذات النتائج السلبية على حياة مشروع المدينة الجديدة. من بين هذه الإجراءات نذكر التقنيات الميكانيكية ، المتمثلة في انجاز سدود صغيرة تشكل بديلا جيدا من حيث الثمن و الفاعلية بالإضافة إلى تلك التقنيات البيولوجية المتماشية مع طبيعة المنطقة ذات المردود النفعي في إطار سياسة تنمashi و الوسط الريفي الذي يغلب عليه طابع التحفظ. مما يسمح لنا وضع حد لهذا المد الأنجرافي و المحافظة على هذه الثروة المائية المتناقصة و المعرضة لمختلف الظروف المناخية و البشرية.

مفتاح الكلمات

اخوار التاكل ، حوض مائي، نقل المواد الصلبة، التوحد

ABSTRACT

In Algeria the weathering of gully erosion has moved from 90 up to 300 t/ha.year, depending on the rain volume the speed of alteration of slopes and overburden of surface of sol. According to Roose, observations on the Mediterranean mountains of the north west of Algeria show a gully erosion in modest ground water even over a strong slope. On the other hand, the gully erosion and the bulk movements mobilize significant volumes of land which find their way into the downstream water management.

The study of solid transportation into Chellif downstream Boughzoul, revealed a rate of specific average erosion of 34.27 t/km².year which traduced by solid transportation at Boughzoul dam with 673000 tons of sediments per year.

Given he magnitude of this phenomenon and the alarming rate of sloughing of Boughezoul dam (63%), expected to play a vital part in building the lake-city, preventive measures have been advocated to fight this hazard which has an impact on the survival of the new city project. The mechanical struggle by way of well conceived thresholds constitute a very noticeable cost-effective alternative combined with value-added biological measures well adapted considered within a concerted approach with a rather reluctant rural population will lead to limit the élan of the phenomenon and will safeguard an increasingly meager resource prone to different aggressions be they climatic or anthropogenic.

Key words :

gully erosion - water cheet - solid transportation - sloughing

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma grande reconnaissance et mon inestimable gratitude aux honorables personnes qui m'ont consacré leur savoir, leurs compétences et leur disponibilité en prenant part à l'élaboration et à l'examen de ce travail :

Messieurs les membres de jury :

Dr. Mohamed BESSENASSE

Pr. Saad.A HAMMOUDI

Dr. Mohamed HABI

Mon encadreur Pr. Boualème REMINI

Ainsi qu'aux responsables des structures suivantes :

A.N.R.H d'Alger, Blida et Tiaret

A.N.B.T d'Alger

A.B.H de Chlef

I.N.S.I.D de Ksar Chellala

STATION METEO de Ksar Chellala

BIBLIOTHEQUE de l' E.N.S.H de Blida

RESIDENCE UNIVERSITAIRE de Ksar Chellala

Je suis également redevable pour l'accueil, l'égard et l'assistance qui m'ont été personnellement réservés par messieurs :

Arabi Mourad de l'I.N.R.F de Médéa

Metidji Messaoud du barrage de Boughzoul

Chikh Abdelkader du barrage de C.Bougara

Hafid Boudaoud de l'I.N.S.I.D Ksar Chellala

Alia Mohamed Institut d'hydraulique de Ksar Chellala

Khaldi Ahmed Institut d'hydraulique de Ksar Chellala

Je saisis cette opportunité pour rendre un hommage solennel et sans égal à mon défunt père et à ma mère pour leurs sacrifices, ainsi qu'à toute ma famille particulièrement :

Fathi, Yacine et leur maman.

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	1
REMERCIEMENTS.....	4
TABLE DES MATIERES.....	5
Liste des illustrations, graphiques et tableaux.....	7
INTRODUCTION.....	9
1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	
1.1 Situation géographique de la commune de Boughzoul.....	11
1.2 Présentation du lac et de son bassin versant.....	13
1.3 Climat.....	16
1.3 Géologie.....	21
1.4 Hydrographie.....	23
1.5 Conclusion.....	31
2. ENVASUREMENT DES BARRAGES EN EXPLOITATION	
2.1 Introduction.....	32
2.2 Description générale de l'envasement	33
2.3 Mécanisme de l'envasement.....	34
2.4 Influence des différentes caractéristiques des retenues sur le mécanisme de l'envasement	35
2.5 Piégeage des sédiments dans la retenue	37
2.6 Méthodes d'évaluation de l'envasement.....	38
2.7 Présentation des barrages en exploitation dans le bassin.....	40
2.8 Prévision de l'envasement de la retenue.....	45
2.9 Conséquences de l'envasement des barrages.....	48
2.10 Actions de lutte contre l'envasement.....	50
2.11 Conclusion.....	52
3. TRANSPORT SOLIDE	
3.1 Introduction.....	53
3.2 Définition de l'érosion.....	53
3.3 Types d'érosion.....	54
3.4 Quantification de l'érosion.....	57
3.5 Le transport solide.....	60
3.6 Conclusion.....	71

4. PRESENTATION ET ETUDE DES DONNEES DE BASE	
4.1 Rappels théoriques.....	72
4.2 Introduction.....	75
4.3 Traitement des données du barrage de Boughzoul	75
4.4 Traitement des données hydro-pluviométriques du sous bassin Oued Touil.....	78
4.5 Traitement des données hydro-pluviométriques du sous bassin Nahr Ouassel.....	87
4.6 Résultats.....	98
4.7 Discussion.....	99
4.8 Identification de la zone mobilisatrice de sédiments.....	100
4.9 Conclusion.....	101
5. LUTTE PREVENTIVE	
5.1 Introduction.....	102
5.2 Mesures biologiques.....	103
5.3 Mesures mécaniques.....	103
5.4 Qualité des seuils.....	109
5.5 Conclusion.....	110
CONCLUSION.....	111
APPENDICE	
A. Plan de situation des postes pluviométriques et hydrométriques (Etude soviétique).....	113
REFERENCES.....	114

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1 Plan de situation de la commune de Boughzoul	11
Figure 1.2 Commune et lac de Boughzoul	12
Figure 1.3 Plan d'aménagement urbain de la nouvelle ville de Boughzoul	12
Figure 1.4 Bassin hydrographique Chellif-Zahrez	14
Figure 1.5 Bassin versant Chellif amont de Boughzoul	15
Figure 1.6 Climagramme d'Emberger	16
Figure 1.7 Carte pluviométrique du bassin versant Chellif amont de Boughzoul	19
Figure 1.8 Carte d'évapotranspiration du bassin versant Chellif amont de Boughzoul	20
Figure 1.9 Carte géologique du bassin versant Chellif amont de Boughzoul	22
Figure 1.10 Réseau hydrographique du bassin versant Chellif amont de Boughzoul	25
Figure 1.11 Carte des sous bassins versants	26
Figure 1.12 Equipement du bassin versant Chellif amont de Boughzoul	30
Figure 2.1 Processus de l'envasement	37
Figure 2.2 Barrage Dahmouni	40
Figure 2.3 Barrage Colonel Bougara	41
Figure 2.4 Lac et Ouvrages du barrage de Boughzoul	43
Figure 2.5 Digue principale du barrage de Boughzoul	44
Figure 2.6 Digue sud du barrage de Boughzoul	44
Figure 2.7 Evolution de l'envasement en fonction du temps	47
Figure 2.8 Etat d'envasement de la retenue de Boughzoul	48
Figure 2.9 Blocage de la vanne de la digue sud du barrage de Boughzoul	49
Figure 3.1 Diagramme de Hjustrom (Simplifié)	60
Figure 3.2 Modes de transport : Charriage -Suspension	60
Figure 3.3 Equilibre d'un grain posé sur le fond d'un lit	62
Figure 3.4 Diagramme de Yalin-Shields	63
Figure 4.1 Apports liquides annuels enregistrés au barrage de Boughzoul	75
Figure 4.2 Identification des grands sous bassins versants oued Touil et Nahr Ouassel	76
Figure 4.3 Envasement moyen du barrage de Boughzoul (1965/2005)	77
Figure 4.4 Ajustement statistique des modules pluviométriques annuels de la station Sidi Bouabdallah	78
Figure 4.5 Apports liquides annuels de oued Touil à la Station Sidi Bouabdallah	79
Figure 4.6 Pluies moyennes mensuelles de oued Touil à la Station Sidi Bouabdallah	80
Figure 4.7 Corrélation mois de septembre	81
Figure 4.8 Corrélation mois de octobre	81
Figure 4.9 Corrélation mois de novembre	81
Figure 4.10 Corrélation mois de janvier	82
Figure 4.11 Corrélation mois de mai	82
Figure 4.12 Apports liquides annuels de oued Touil (série comblée)	86
Figure 4.13 Apports solides annuels de oued Touil	86
Figure 4.14 Ajustement statistique des modules pluviométriques annuels à la station C.Bougara	87
Figure 4.15 Apports liquides annuels enregistrés au barrage de Boughzoul (83/91)	90

Figure 4.16 Apports liquides annuels détaillés de Nahr Ouassel	90
Figure 4.17 Apports liquides annuels nets des sous bassins oued Touil et Nahr Ouassel	96
Figure 4.18 Apports solides annuels nets des sous bassins oued Touil et Nahr Ouassel	96
Figure 4.19 Corrélation des apports annuels nets de oued Touil	97
Figure 4.20 Corrélation des apports annuels nets de Nahr Ouassel	97
Figure 4.21 Zone mobilisatrice de sédiments	101
Photo 5.1. Seuil en gabions	104
Photo 5.2. Seuil en pierres sèches (ravine en U)	105
Photo 5.3 Seuil en pierres sèches (ravine en V)	105
Photo 5.4 Seuil à grillage métallique (Avant)	106
Photo 5.5 Seuil à grillage métallique (Après)	106
Photo 5.6 Seuil en sacs plastiques	107
Photo 5.7 Seuil en pneus usés (Avant)	108
Photo 5.8 Seuil en pneus usés (Après)	108
Tableau 1.1 Caractéristiques de la retenue de Boughzoul	13
Tableau 1.2 Température de l'air en degré Celsius	18
Tableau 1.3 Paramètres morphométriques des sous bassins	27
Tableau 1.4 Postes pluviométriques	28
Tableau 1.5 Caractéristiques des stations hydrométriques	29
Tableau 2.1 Levé bathymétrique du barrage de Dahmouni	40
Tableau 2.2 Levé bathymétrique du barrage Colonel Bougara	41
Tableau 2.3 Levé bathymétrique du barrage Boughzoul	43
Tableau 2.4 Récapitulation des résultats	46
Tableau 2.5 Evolution de l'envasement en fonction du temps	47
Tableau 3.1 Calcul empirique de la dégradation spécifique en t/km ² .an	68
Tableau 3.2 Etat d'envasement de quelques barrages algériens	71
Tableau 4.1 Caractéristiques statistiques des apports liquides annuels au barrage de Boughzoul	76
Tableau 4.2 Caractéristiques statistiques de la pluviométrie à la station Sidi Bouabdallah	78
Tableau 4.3 Apports liquides mensuels de oued Touil en Mm ³	79
Tableau 4.4 Pluies mensuelles à la station Sidi Bouabdallah	80
Tableau 4.5 Apports liquides mensuels de oued Touil en Mm ³ (après comblement)	83
Tableau 4.6 Concentrations moyennes à la station Sidi Bouabdallah en g/l	84
Tableau 4.7 Apports solides mensuels de oued Touil en tonnes	85
Tableau 4.8 Caractéristiques statistiques de la pluviométrie à la station C.Bougara	87
Tableau 4.9 Apports liquides mensuels enregistrés au barrage de Boughzoul	88
Tableau 4.10 Apports liquides mensuels détaillés de Nahr Ouassel en Mm ³	89
Tableau 4.11 Concentrations moyennes en g/l	91
Tableau 4.12 Apports solides mensuels nets de Nahr Ouassel en tonnes	92
Tableau 4.13 Pertes en apports liquides mensuels de oued Touil en Mm ³	93
Tableau 4.14 Apports liquides mensuels nets de oued Touil au barrage de Boughzoul en Mm ³	94
Tableau 4.15 Apports solides mensuels nets de oued Touil au barrage de Boughzoul en tonnes	95
Tableau 4.16 Apports annuels nets des sous bassins oued Touil et Nahr Ouassel	97
Tableau 4.17 Résultats	98
Tableau 4.18 Apports liquides et solides moyens annuels de oued Touil (Mission soviétique)	99
Tableau 5.1 Qualité des seuils testés	109

INTRODUCTION

Dans le cadre de sa vision géostratégique relative à l'aménagement et au développement durable du territoire, l'état à travers son schéma national d'aménagement du territoire (S.N.A.T) a promulgué la loi 01/20 du 12 décembre 2001, portant création de villes nouvelles.

Favoriser le redéploiement de la population du nord vers le sud, est l'une des préoccupations majeures des pouvoirs publics, c'est ainsi qu'a germé l'idée d'une option hauts plateaux, où la petite commune de Boughzoul (actuellement 16500 habitants) a été jugée éligible pour être érigée en nouvelle ville (décret exécutif 04-97) devant accueillir plus de 350000 habitants d'ici l'an 2025.

En misant sur l'aspect attrayant de l'œuvre, la conception du schéma d'aménagement global de la ville se voudra être un symbole aussi bien sur le plan urbanistique qu'esthétique. Seule la variante ville lac se distingua du lot et gagna l'entière satisfaction des décideurs.

Le barrage de Boughzoul représente par son lac un atout d'une grande importance pour cette option mais faut-il signaler que ses ouvrages datent de 1934 et sont conçus pour des objectifs bien définis, en plus de l'écrêtement des crues, une décantation primaire et un volume de stockage complémentaire de 55 Mm³ doivent être assurés pour le barrage de Ghrib, or il se trouve qu'actuellement, sa capacité est réduite à 20.27 Mm³ (Bathymétrie 2005) à cause des sédiments piégés dans la retenue.

Si l'alimentation en eau potable de la population future de la nouvelle ville sera satisfaite par la projection d'un champ captant à partir de la région de Birine (Djelfa), il n'en demeure pas moins que la pérennisation de l'eau du lac exigée pour maintenir une biodiversité et assurer les activités nautiques et récréatives essentielles pour la ville, reste un problème majeur pour cette option que ni l'alluvionnement du barrage ni le déficit hydrique chronique de la région ne plaident en sa faveur.

Le thésard, assisté par son encadreur essaie de remonter la pente du principal cours d'eau du B.V.C.A.B pour s'enquérir de l'activité hydrologique qui y règne et voir son impact sur la mobilisation des eaux superficielles de la nouvelle ville de Boughzoul.

Par ailleurs, le sous équipement des réseaux météorologique et hydrométrique ainsi que le manque flagrant des observations notamment en matière de turbidité n'ont pas rendu possible l'approfondissement de l'étude du phénomène de transport solide. Toute fois avec les mesures disponibles, il est possible de dégager les grands traits fondamentaux qui caractérisent le bassin et conditionnent la viabilité du projet.

Dans une première étape on s'intéresse à la présentation des données générales qui caractérisent la zone d'étude et les différents facteurs qui favorisent l'écoulement superficiel et le transport solide.

La seconde étape est consacrée à l'étude de l'envasement des barrages en exploitation dans la zone d'étude, et plus particulièrement, celui de Boughzoul avec la prévision de sa durée de vie.

La troisième étape met en relief les causes et les mécanismes qui sont à l'origine du transport des sédiments en général.

La quantification des apports liquides et solides constitue un point crucial sur lequel repose l'essentiel de l'étude à la quatrième étape, car il y va du devenir de cet ambitieux projet.

La mise au point de certaines techniques de lutte préventive, très pratiques et moins coûteuses, telles qu'illustrées à la fin, semble être un moyen très efficace pour endiguer les conséquences néfastes de ce phénomène qui ne cesse de se développer et gagner de l'ampleur.

CHAPITRE 1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1.1 Situation géographique de la commune de Boughzoul

La commune de Boughzoul relève administrativement de la daïra de Chahbounia, elle est située à environ 80 km au sud de son chef lieu de wilaya (Médéa). (Figure 1.1)

Elle s'étend sur une superficie de 44800 ha avec une population de 16500 habitants, administrativement elle est limitée :

- Au nord par les communes de Saneg et Oum Djellil
- A l'ouest par les communes de Chahbounia et Aziz
- A l'est et au sud par la wilaya de Djelfa.

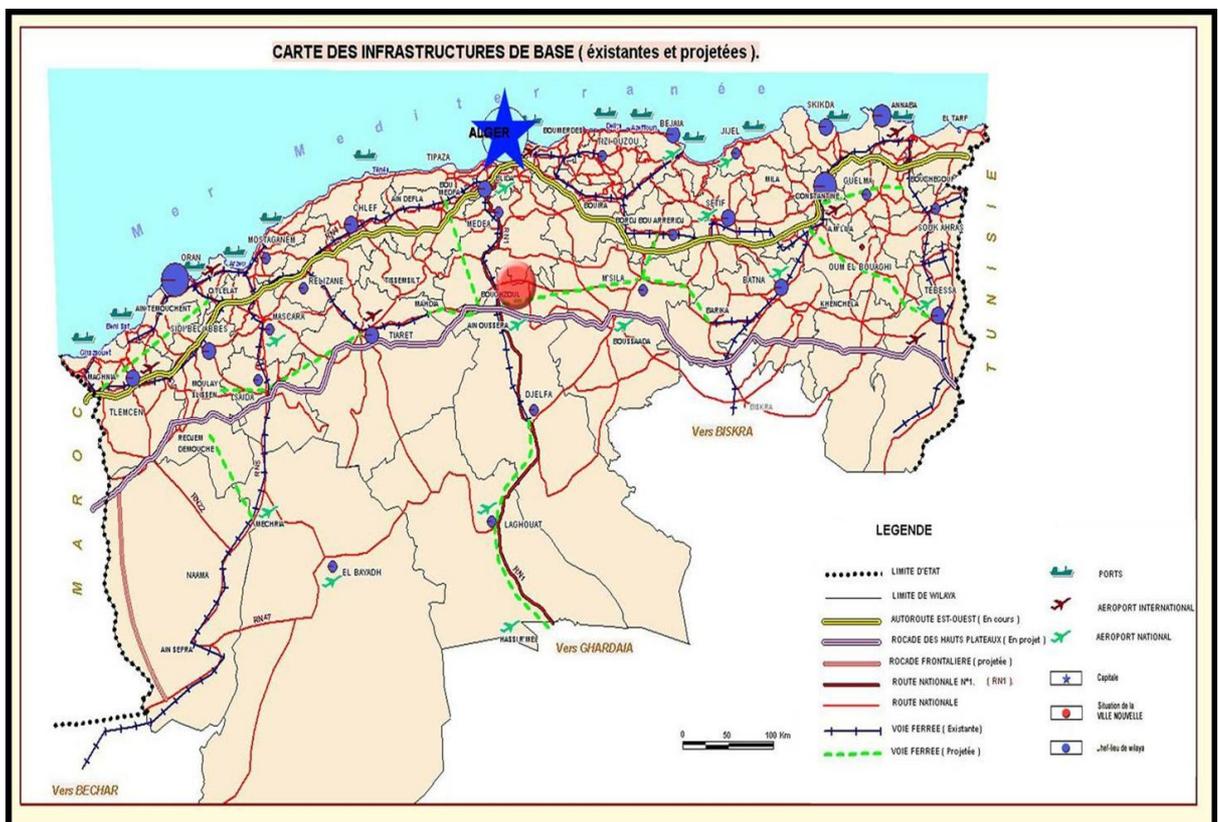


Figure 1.1 Plan de situation de la commune de Boughzoul

En raison de l'intersection de ses deux axes de communication stratégiques la RN1 et la RN40, elle représente un carrefour de liaisons nord-sud et est-ouest très important, atout

pour lequel, l'intérêt des pouvoirs publics s'est manifesté pour lancer les assises d'une politique de développement et d'échange entre les régions de grande envergure.

Selon le découpage de la wilaya en zones agropédologiques, la commune de Boughzoul s'insère dans la zone "Sersou Médéa à typologie agropastorale".

Une surface foncière de 4650 ha est réservée pour la concrétisation du plan d'aménagement urbain de la future ville nouvelle, caractérisé par cinq ensembles urbains agglutinés autour du lac formé par le barrage de Boughzoul dont la capacité est de 55M m³, offrant un plan d'eau de 2056 ha. (Figures 1.2,3)

Le tertiaire supérieur, la recherche scientifique et les technologies avancées, constituent les principaux segments de la vocation de cette ville moderne censée accueillir 350000 habitants d'ici l'an 2025.



Figure 1.2 Commune et lac du barrage de Boughzoul

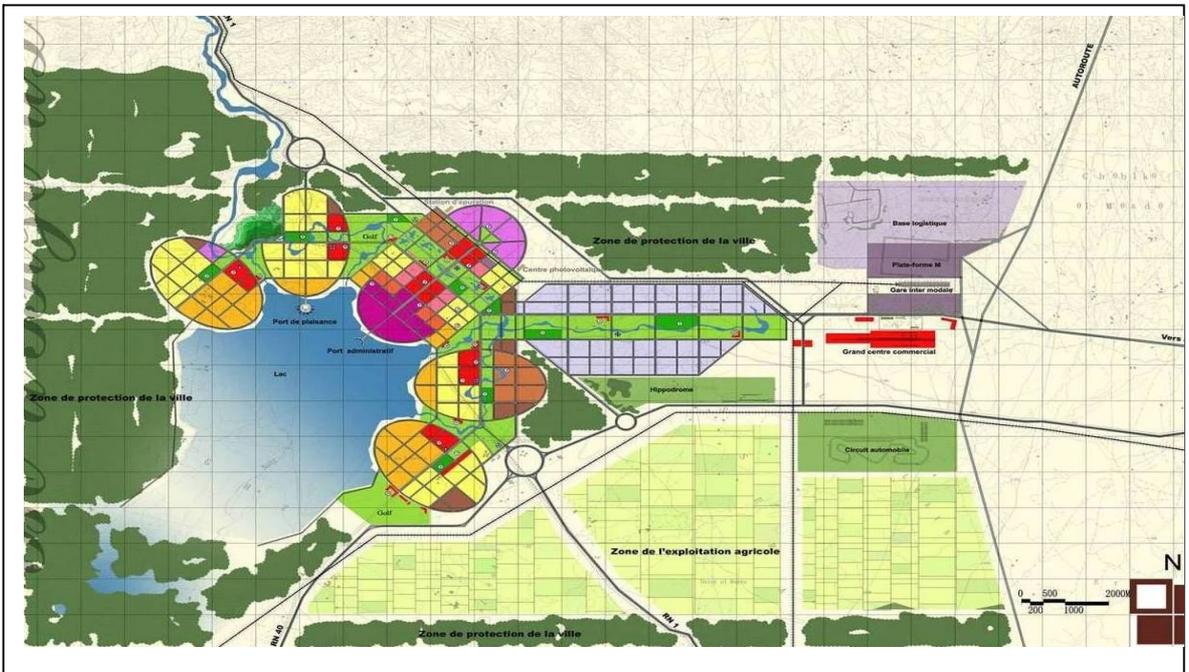


Figure 1.3 Plan d'aménagement urbain de la nouvelle ville de Boughzoul

1.2 Présentation du lac et de son bassin versant

Un lac est le reflet de son bassin versant, son état est directement influencé par la taille la topographie et la géologie de ce dernier, ainsi que l'utilisation du sol qui y est faite et la végétation qui y règne.

Par ailleurs, le régime hydrologique caractérisé par les apports aussi bien liquides que solides conditionne aussi bien la viabilité que la vie d'un lac.

a- Le lac de Boughzoul

Situé dans la wilaya de Médéa, le barrage de Boughzoul retient grâce à sa capacité de 55 Mm³, les apports des oueds Touil et Nahr Ouassel.

Depuis 1934, date de sa mise en service, le barrage assure les missions suivantes :

- Stockage de l'eau
- Décantation primaire des vases pour la protection de barrage Ghrib
- Ecrêteur de crues

Les résultats révélés par les travaux topographiques et bathymétriques effectués au mois de janvier 2005 [1] ont mis à nu l'état d'envasement avancé du barrage avoisinant les deux tiers de son volume utile, soit 63%, ce qui compromet sérieusement son rôle structurant dans l'aménagement urbain de la ville –lac, censée répondre aux exigences des infrastructures et des activités aussi bien nautiques que récréatives qui nécessitent la pérennisation de l'eau du lac. La nature semi aride de la région, accusant un déficit hydrique chronique constitue une contrainte supplémentaire pour la variante choisie, poussant ainsi les experts à envisager le recours au transfert d'eau à partir d'autres barrages de la région si nécessaire.

Tableau 1.1 Caractéristiques de la retenue de Boughzoul

Niveaux	Cotes en m	Surfaces en ha	Volumes en Mm ³
C.N.R	634.20	2056.44	20.271
C.H.E	635.20	2764.79	44.352

b- Le bassin versant

Situé au centre ouest de l'Algérie du nord, le bassin hydrographique du chellif s'étend sur une superficie de 43750 km², c'est le plus vaste bassin hydrographique du nord du pays. Il est compartimenté naturellement en trois bassins (Figure 1.4) [2]

- Le bassin du bas chellif et de la mina
- Le bassin du haut et moyen chellif
- Le bassin du chellif amont de Boughzoul

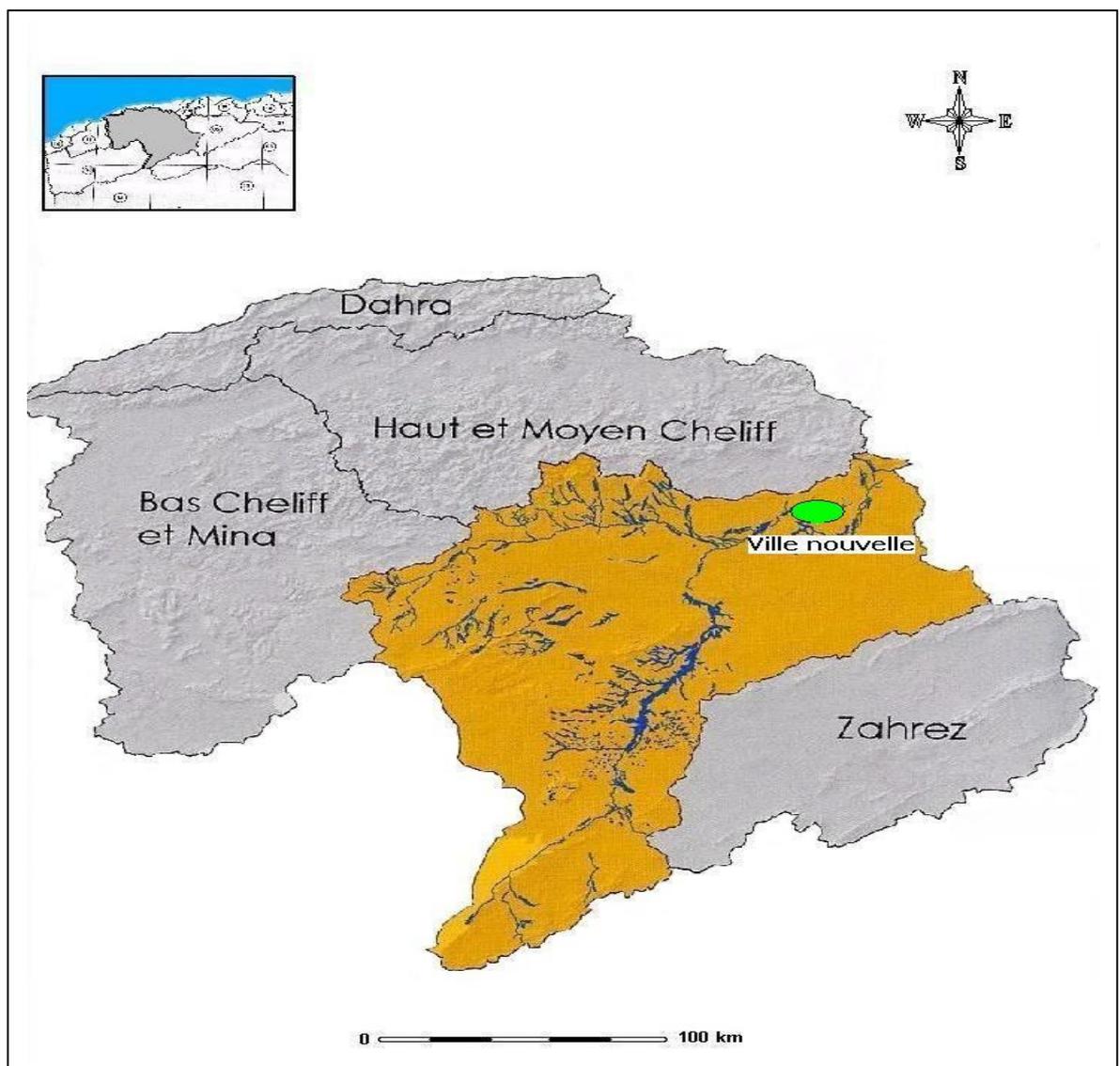


Figure 1.4 Bassin hydrographique Chellif-Zahrez

1.3 Climat

La zone d'étude est située d'après le climagramme d'Emberger (Figure 1.6) [3] dans le semi aride frais à la limite de l'aride, s'exprimant par des précipitations rares et irrégulières, une grande évaporation et des oscillations notables des températures du jour à la nuit et de l'hiver à l'été.

L'été est sec et chaud, l'hiver est froid.

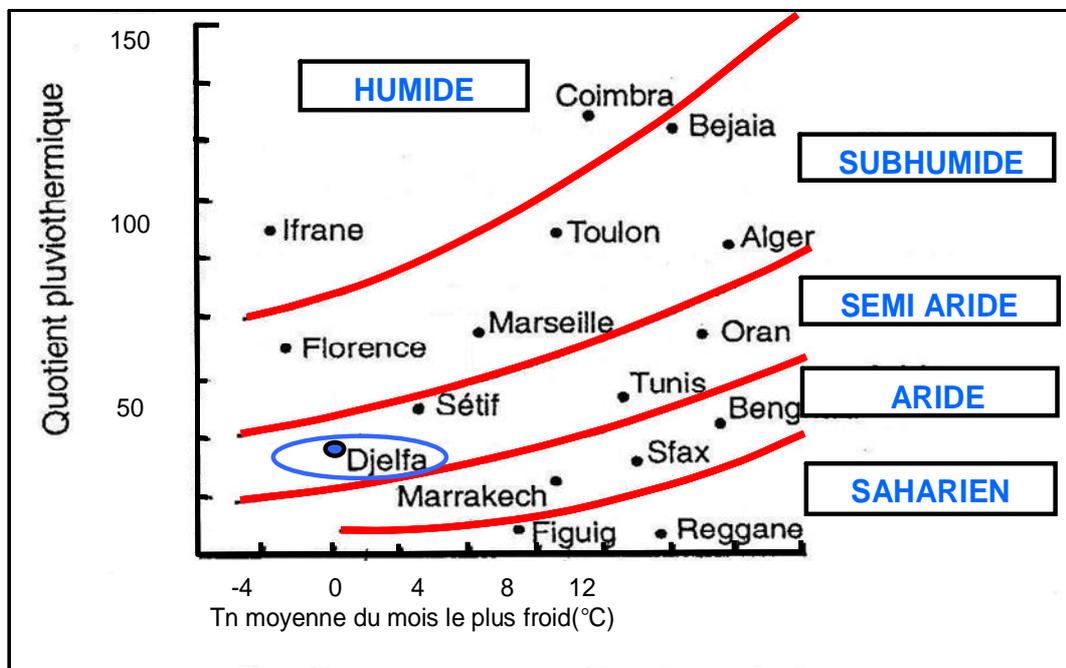


Figure 1.6 Climagramme d'Emberger

1.3.1 Température de l'air

La température moyenne annuelle dans le bassin versant varie de 13°C dans les parties montagneuses jusqu'à 16.2°C dans la plaine, la période chaude s'étale dès le mois de mai au mois de septembre avec les températures moyennes mensuelles de 18°C à 27°C dans la plaine et de 7°C à 14°C en période froide d'octobre à avril.

Le maximum absolu de la température de l'air atteint 47°C dans la plaine tandis que le minimum absolu baisse jusqu'à -6°C. [4]

Le tableau 1. 2 nous donne les observations de quatre stations implantées du sud au nord de la zone.

1.3.2 Le vent

En saison hivernale, sur tout le territoire de l'Algérie prédominent les vents ouest. Les vitesses annuelles du vent varient de 2.9 à 5.1 m/s d'après la station de Ksar Chellala. Au cours de la période estivale sont observés les vents secs et chauds 'SIROCCO' soufflant des régions désertiques et ayant un effet funeste sur la végétation.

A cause de l'étendue du plan d'eau du barrage de Boughzoul (2056ha), un événement venteux récent de 60 km/h a engendré une perte de 1Mm³ d'eau, au bout d'une semaine, soit l'équivalent de 10 à 30cm d'évaporation.

1.3.3 Précipitations

Les hauteurs des précipitations moyennes interannuelles dans le bassin varient en gros de 150 mm à 400 mm [1968-2001] (Figure 1.7) [2]. La plus grande quantité tombe dans les régions montagneuses au nord ouest du bassin (370 – 420mm) tandis que la quantité minimale tombe dans la plaine 173 mm à Sidi Bouabdallah à cause des perturbations cycloniques qui arrivent appauvries en vapeur d'eau, suite à leur passage sur l'écran montagneux du Tell.

Tableau 1. 2 Températures de l'air en degré Celsius

Stations	Type	Période	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Année
Aflou	Moyenne	1913/1953	4.3	3.5	8.3	10.8	15.7	20.4	24	23.9	19	14	8.4	4.8	13.1
	Max absolu		19	16.5	24.8	27	31.3	35.6	38.8	39.3	34.3	30.8	24	19	39.3
	Min absolu		-7.5	-7.7	-4.5	-2.4	0.5	4.3	8.3	8.7	3.7	-1	-2.9	-7.5	-7.7
Djelfa	Moyenne	1913/1953	4.2	5.6	8.2	14.4	15.6	20.3	24.3	24	19.8	13.6	8.6	4.8	13.4
	Max absolu		20	23.7	25.5	30	33.2	33	40	39	36.6	31.1	24.5	21.3	40
	Min absolu		-9.8	-12	-10	-5.3	-2.5	-4	6.1	7.8	1	-2.1	-4.7	-9.4	-12
	Moyenne	1995/2004	5,2	6,6	9,7	12,1	17,1	22,9	26,3	25,7	20,6	15,6	9,3	6,2	14,8
Ksar Chellala	Moyenne	1913/1953	6.8	8.2	11	14	18.4	23	27.2	27.4	23.3	16.6	11	7.4	16.2
	Max absolu		21.8	26.2	29	33	37	42	47.2	42.8	39.1	38.8	29.2	22.1	47.2
	Min absolu		-5	-4.6	-4	-2	1.5	4.5	9.7	9.5	5.1	2	-2.2	-6	-6
	Moyenne	1990/1999	7,5	9,1	11,7	13,9	19,4	24,7	28,4	28,0	23,2	17,3	12,0	8,0	16,9
	Max absolu		12.3	14.5	17.5	19.5	26.3	32.3	36.4	35.5	29.7	23.1	17.1	13.4	36.4
	Min absolu		2.9	3.3	5.8	7.8	12.5	17.1	20.3	20.4	16.6	11.6	6.8	4.8	2.9
Boughzoul	Moyenne	2000/2007	7.6	8.3	12.5	15.8	20.4	27.9	31.8	30.6	24.2	24.2	10.9	8.7	18.6
	Max absolu		13,2	14,0	18,5	22,1	27,1	34,4	38,8	37,8	31,2	25,0	15,6	13,6	38.8
	Min absolu		1,9	2,7	6,5	9,5	13,7	21,4	24,8	23,5	17,2	12,8	6,2	3,8	1.9

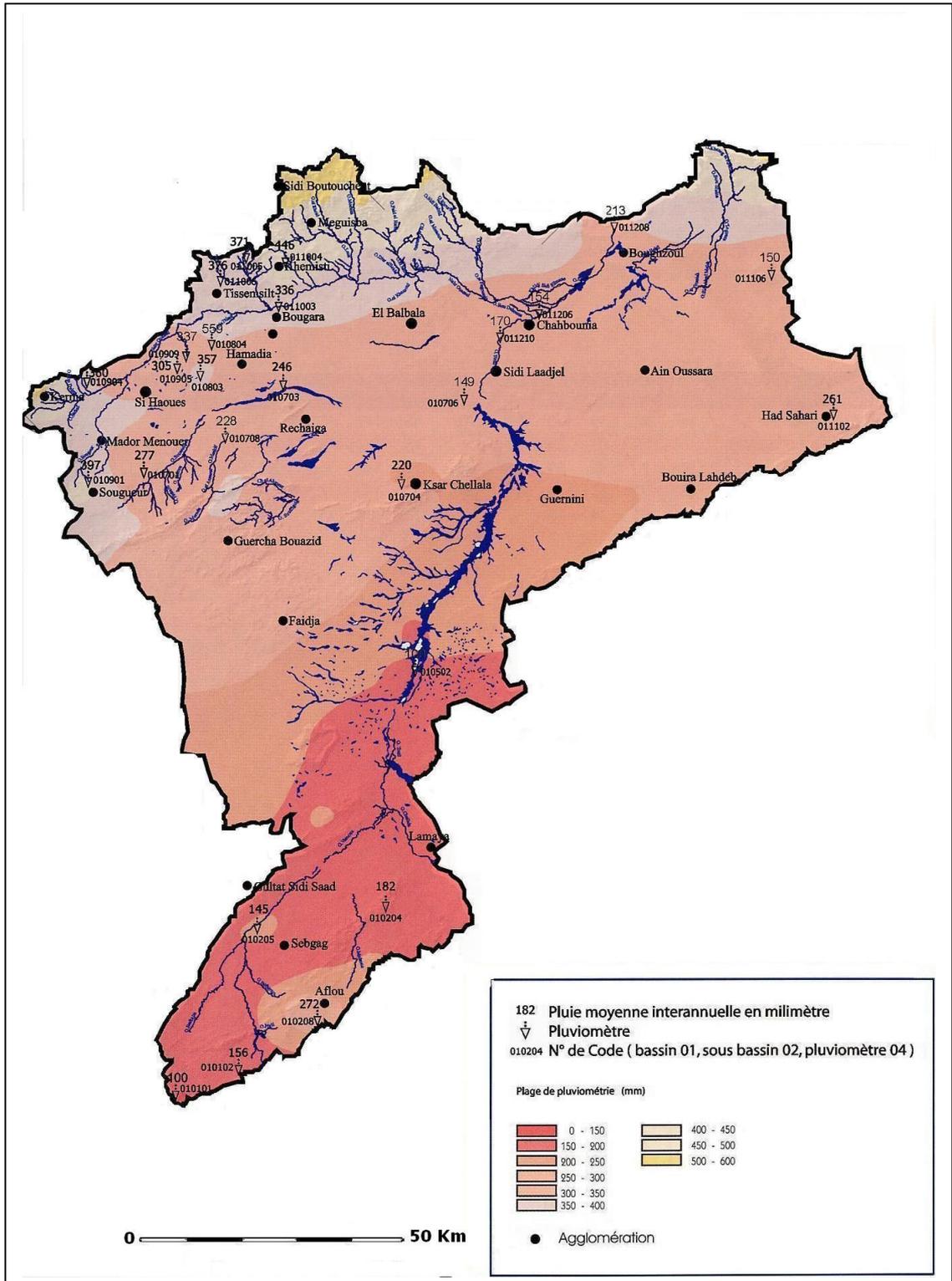


Figure 1.7 Carte pluviométrique du bassin versant Chellif amont de Boughzoul

1.3.4 L'évapotranspiration

La carte de l'évapotranspiration (cartes de l'évapotranspiration mensuelle et annuelles éditées par les services de l'ANRH), présente de fortes valeurs dans le centre du bassin. Le total du potentiel évapotranspiré annuellement varie entre une valeur maximale de 1555mm à la station de Ksar Chellala et une autre minimale à la station de Tissemsilt de 1330mm. (Figure 1.8)

Par ailleurs, l'évaporation moyenne interannuelle du plan d'eau libre du barrage de Boughzoul a enregistré une augmentation notable depuis 1955/1966 où elle était de 1370mm pour s'élever en 2000/2007 à 1547mm (source : barrage de Boughzoul)

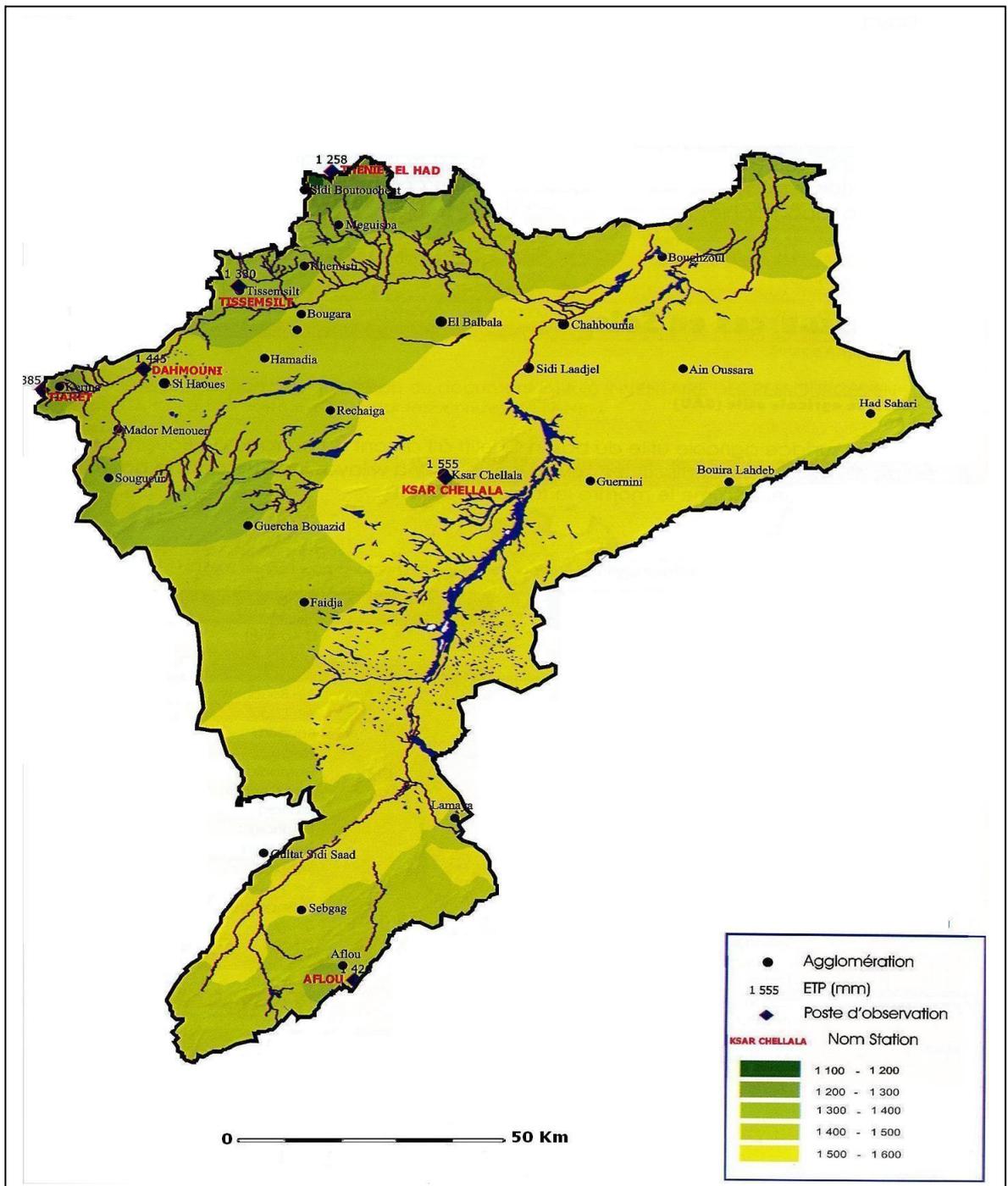


Figure 1.8 Carte d'évapotranspiration du bassin versant Chellif amont de Boughzoul

1.3 Géologie

L'Algérie se divise de la méditerranée au Sahara, en cinq unités géographiques et structurales plus ou moins parallèles du Nord au Sud

- Les chaînons calcaires littoraux
- L'Atlas tellien
- Les hautes plaines
- L'Atlas saharien
- Le Sahara

La région étudiée, se situe dans les hautes plaines, entre les reliefs de l'Atlas tellien au nord, plus précisément, le massif de Ouarsenis dont les charriages telliens, les plus méridionaux viennent les recouvrir en partie, et l'Atlas saharien qui s'étend vers le nord, en une succession de massifs qui viennent border les hautes plaines du sud.

Un aperçu sur la géologie au centre du bassin (Figure 1.9) [5] laisse se distinguer par leurs importances, les dépôts post miocènes dont :

- a- Les alluvions modernes : régulièrement réparties le long des cours d'eau formés de sables limoneux extrêmement vulnérables à l'érosion hydrique
- b- Accumulations des piedmonts : Aux pieds des reliefs s'étendent d'importants glacis d'accumulations presque uniquement constitués de blocs et de galets de dolomie tithonique.
- c- Daïa temporaire : Dépression endoréique tapissée d'argile gypseuse et gréseuse et temporairement recouverte par les eaux ; elles représentent des aires de stockage d'eau importantes.
- d- Croûte calcaire : Les encroûtements calcaires couvrent de grandes surfaces, leur épaisseur est souvent supérieure à 1 m.
- e- Argiles gréseuse rouge : Cette formation est très importante au sud ouest ou son épaisseur peut dépasser 10 m.

Grâce à leurs qualités de porosité et perméabilité, les formations gréseuses du crétacé inférieur représentent le meilleur réservoir hydraulique de la région.

Ces grés constituent eux-mêmes un impluvium étendu, mais ils sont en outre alimentés par la nappe du Sersou et par les eaux de l'oued Touil.

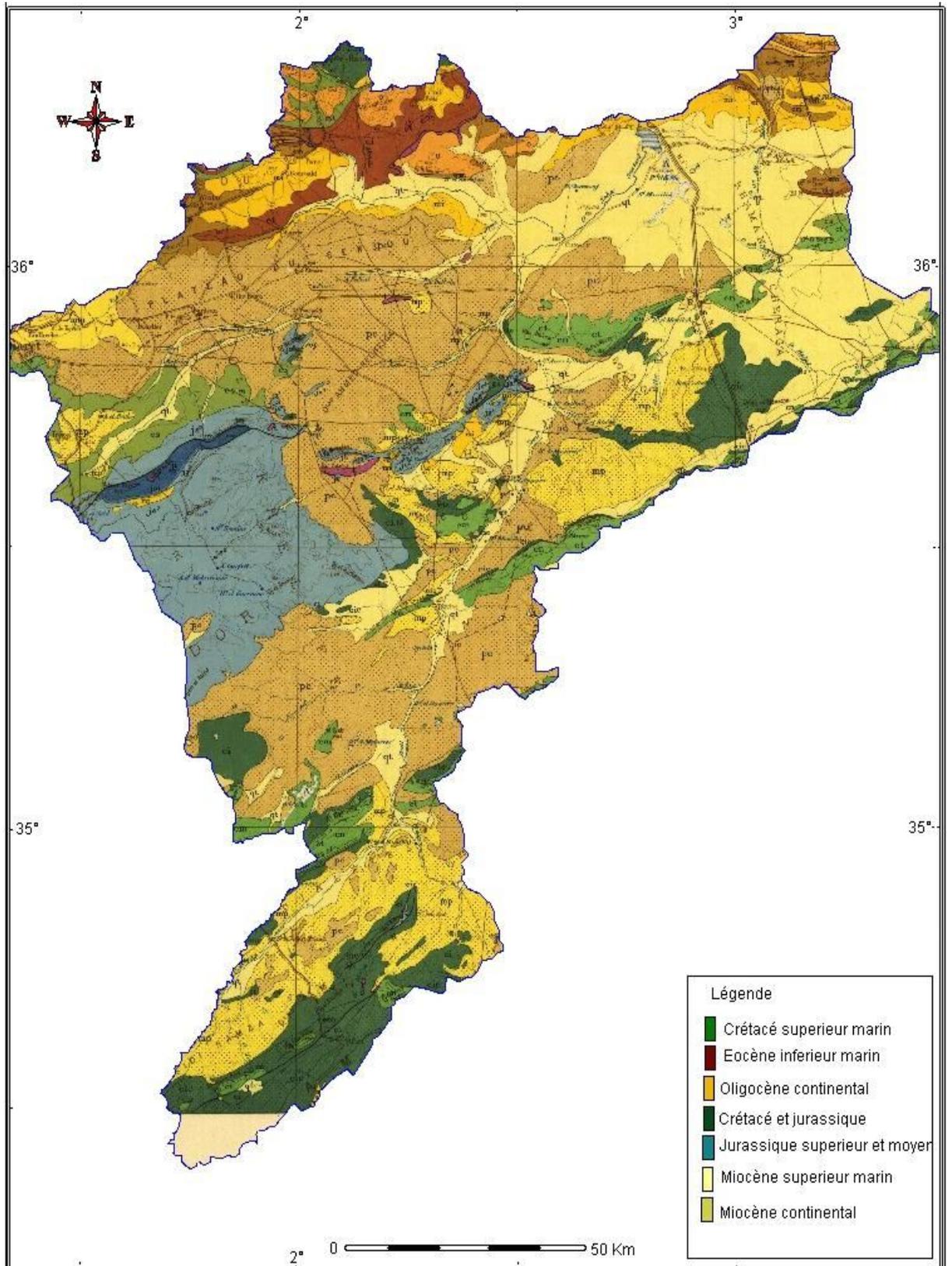


Figure 1.9 Carte géologique du bassin versant Chellif amont de Boughzoul

1.4 Hydrographie

Les principaux oueds du bassin versant du Chellif amont de Boughzoul sont oued Touil et Nahr Ouassel (Figure 1.10).

1.4.1 Oued Touil

La superficie totale du bassin versant de L'oued Touil est de 11460 km² dont 8255 km², surface active contrôlée par le poste hydrométrique de Sidi Bouabdallah.

Sa longueur étant de 288 km, et son altitude moyenne est de 1020m.

Les principaux affluents de l'oued Touil sont oued Sebgag et Chellal qui prennent naissance sur les versants nord des monts Djebel Amor de l'Atlas saharien.

Dans son parcours l'oued Touil traverse les hauts plateaux qui représentent une zone semi-désertique recouverte d'Alfa et d'Absinthe avec de nombreuses dépressions fermées, dont le nom local est Daïa ou l'eau s'accumule lors des pluies favorisant l'écoulement endoréique.

Le bassin de Touil est asymétrique, la rive gauche est plus développée que la rive droite, de l'aval vers l'amont on rencontre les affluents suivants oued Sakni, Zalech, Bouchouat, Ermets et Ouerk.

Marécageuse et couverte d'herbe, la plaine inondable est assez large et décrit par endroits de nombreux méandres en formant ici et là plusieurs bras et petits cours d'eau. Le régime de l'oued Touil est caractérisé par l'absence de l'écoulement d'eau durant la plus grande partie de l'année. Le débit de Touil n'est formé que par les pluies torrentielles ou prolongées.

Dans le cours inférieur du Touil on constate le rabatement des débits d'eau dans la plaine inondable et les pertes de l'écoulement allant au remplissage des dépressions et des micros cavités de la terre submersible.

1.4.2 Nahr Ouassel

L'oued Nahr Ouassel est en fait constitué de deux branches principales, l'oued Nahr ouassel proprement dit, originaire de la région de Tiaret et l'oued Bou Skif qui prend sa source plus au sud vers Sougheur. Il coule dans une vaste plaine d'altitude 950 m environ bordé au nord par les monts de Tiaret (culminant à 1225m) et au sud par le plateau de Sersou d'altitude proche de 1000m.

Le plateau est parsemé de dépressions ou Daïa dont la surface totale peut être estimée à 125 km². Une partie du bassin versant de l'oued Bou Skif est donc endoréique, c'est-à-dire que les ruissellements de surface n'atteignent pas l'oued mais sont piégés dans le centre de ces dépressions.

Les deux oueds ont un lit mineur à faible capacité d'écoulement méandrant dans une plaine sans lit majeur marqué. Les crues s'épandent largement dans cette plaine, arrivé au niveau de Tissemsilt l'oued rencontre son deuxième affluent principal oued Boukaala qui draine un bassin versant de 244km², ayant une forme ramassée.

Le réseau hydrographique de ce dernier semble beaucoup plus efficace que celui du reste du bassin de l'oued Nahr ouassel ; les terrains semblent plus imperméables, les lits mineurs sont bien marqués, le relief est plus accusé.

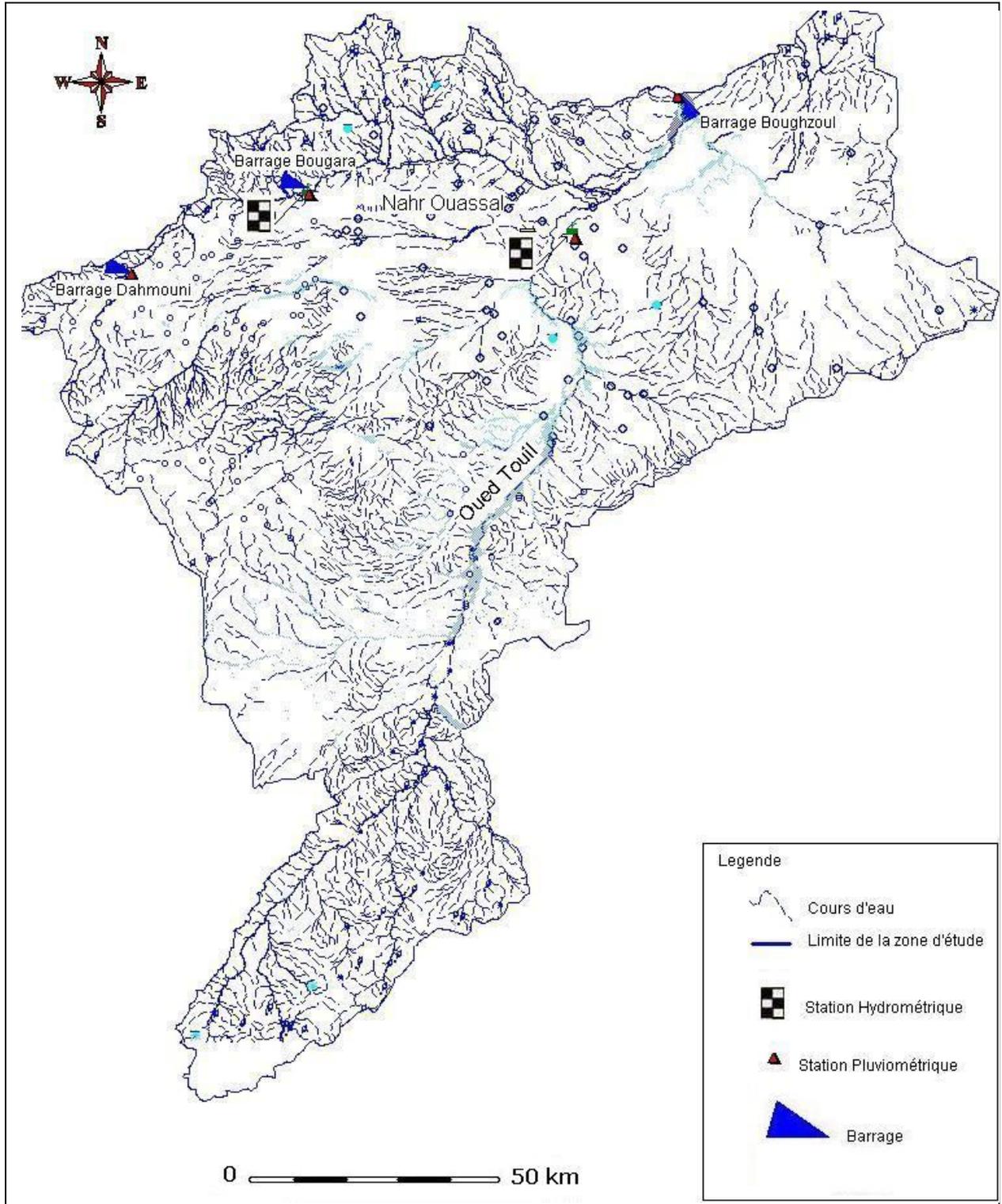


Figure 1.10 Réseau hydrographique du bassin versant Chellif amont de Boughzoul

1.4.3 Paramètres morphométriques des sous bassins versants

Le bassin du Chellif amont de Boughzoul regroupe douze sous bassins versants du 0101 au 0112 (Figure 1.11). Il présente un chevelu hydrographique faible, avec un réseau de l'ordre de 1468 km d'oueds permanents et 8395 km d'oueds temporaires.[2]

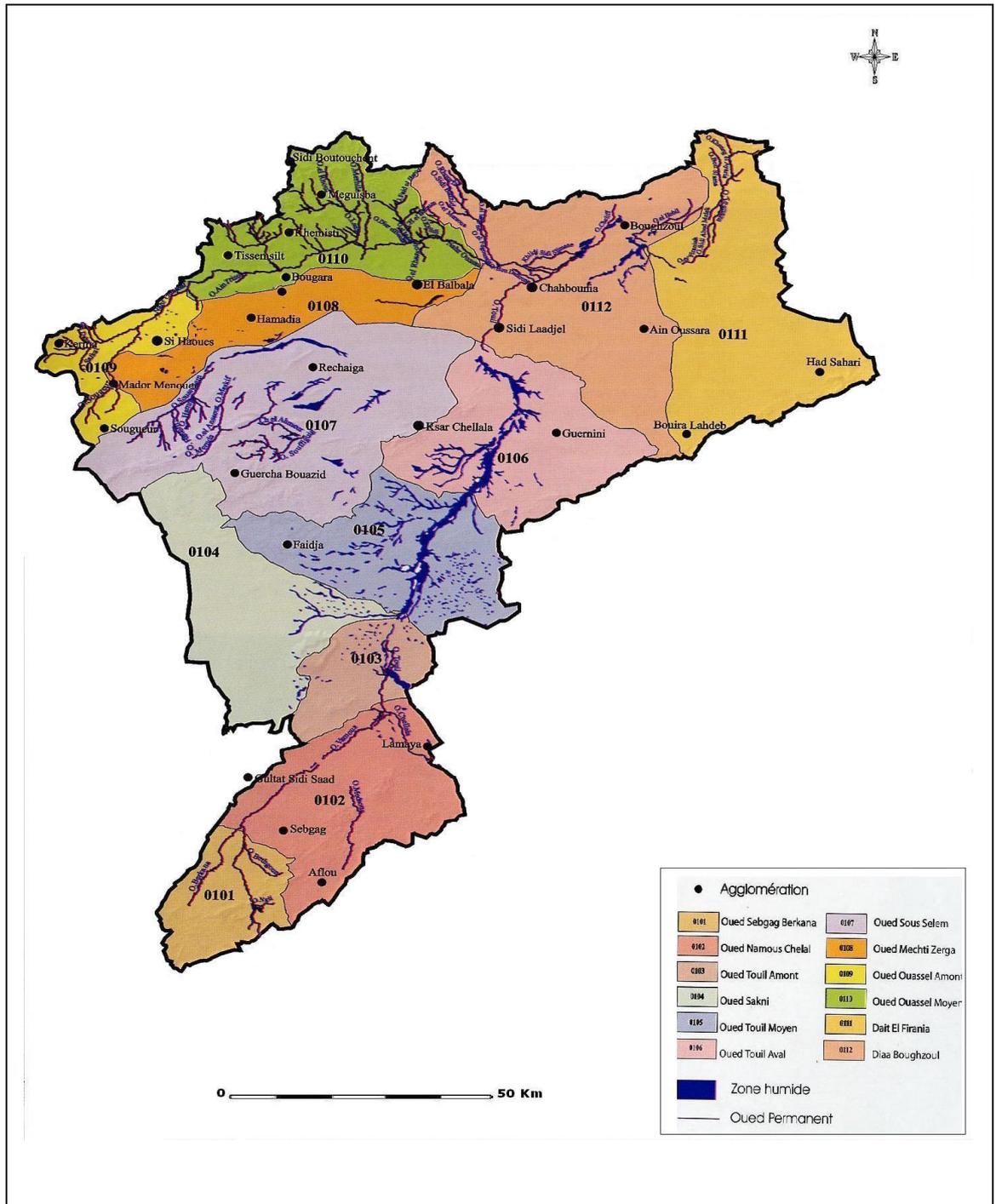


Figure 1.11 Cartes des sous bassins versants

Tableau 1.3 Paramètres morphométriques des sous bassins

Numéros	Oued	Surfaces Km ²	Périmètre Km	Longueur Chevelu Km	K	Longueur rect- équ Km	Largeur Rect- équ Km	Dd	Hmin m	Hmoy m	Hmax m	Ds
101	O.Sbgag Berkana	777.73	129.61	544.27	1.3	48.9	15.90	0.70	1150	1425	1700	1576
102	O.Namous Chelal	1734.3	210.15	1446.43	1.41	84.57	20.51	0.83	1000	1350	1700	1160
103	O.Touil amont	689.58	123.09	646.13	1.31	46.82	14.73	0.94	900	1075	1250	1048
104	O. Sakhni	1675.14	245.10	563.46	1.68	106.88	15.67	0.34	900	1175	1450	721
105	O.Touil moyen	1604.32	213.82	854.25	1.49	88.85	18.06	0.53	800	1050	1300	789
106	O.Touil aval	1750.85	202.00	1105.65	1.35	78.77	22.23	0.63	700	1000	1300	1068
107	O.Sousselem	3005..10	280.66	1748.41	1.43	113.96	26.37	0.58	700	1100	1500	984
108	O.Mechti Zerga	1055.35	225.03	395.38	1.94	102.19	10.33	0.37	700	900	1100	549
109	O.Ouassel amont	626.53	156.66	375.24	1.75	69.29	9.04	0.6	900	1050	1200	607
110	O. Ouassel moyen	1621.66	237.91	1145.49	1.65	103.25	15.71	0.71	700	1225	1750	1425
111	Daïat el Firania	2366.23	279.84	796.62	1.61	120.24	19.62	0.34	650	1025	1400	874
112	Daïa Boughzoul	2817.97	340.47	1991.05	1.8	151.65	18.58	0.71	650	1200	1750	1017

1.4.4 Equipement du bassin versant Chellif amont de Boughzoul

a) Caractéristiques des postes pluviométriques

Le bassin du Chellif amont de Boughzoul compte 34 postes pluviométriques (Figure 1.12)[2]

- 28 appartiennent au réseau de l'A.N.R.H dont 02 à l'arrêt
- 06 appartiennent au réseau de l'O.N.M

Le tableau suivant montre la répartition de quelques postes pluviométriques sur le bassin

Tableau 1.4 Postes pluviométriques

Noms des Sous bassin	Numéros	Stations	codes	X Km	Y Km	Z m
Oued Sebgag Berkana	0101	Sebga Centrez	010102	426.55	379.2	1420
Oued Namous Chelal	0102	Guel Sidi Saad	010205	432	111.6	1100
Oued Touil moyen	0105	Z.E.A	010502	464.45	177.8	820
Oued Sousselem	0107	Rechaiga	010703	434.5	234.5	830
Oued Mechti Zerga	0108	Mehdia	010803	413.9	237.3	903
Oued Ouassel amont	0109	Sougueur	010901	390.55	210.7	1120
Oued Ouassel moyen	0110	C.Bougara	011003	433.30	251.1	820
Daiat el Firania	0111	Ain Boucif	011104	540.75	287.8	1250
Diaa Boughzoul	0112	Kef Lesfar	011207	480.8	252.8	690

b) Caractéristiques des stations hydrométriques

Pour la connaissance du régime hydrologique des cours d'eau de la région, on dispose des données d'observations de deux stations hydrométriques exploitables sur huit (Figure 1.12) Le manque d'étalonnage nous a obligé d'écarter le reste, à l'exception de la station Kef Lesfar qui fournit des mesures très utiles en matière de concentrations

Tableau 1.5 Caractéristiques des stations hydrométriques (A.N.R.H)

Stations	Oueds	X Km	Y Km	S Km ²	Perim BV km	Kc	Long Oued km	Long Rect km	Alt Max m	Alt Moy m	Alt Min m
Sidi Bouabdallah	Touil	483.10	245.8	11460	310	0.81	136	140	1720	1020	667
Colonel Bougara	Ouassel	432.45	251.2	1000	200	1.77	79	88.70	1239	1019	800
Kef Lesfar	Ouassel	480.15	252.97	3310	285	1.38	135	119.2	1522	1098	675

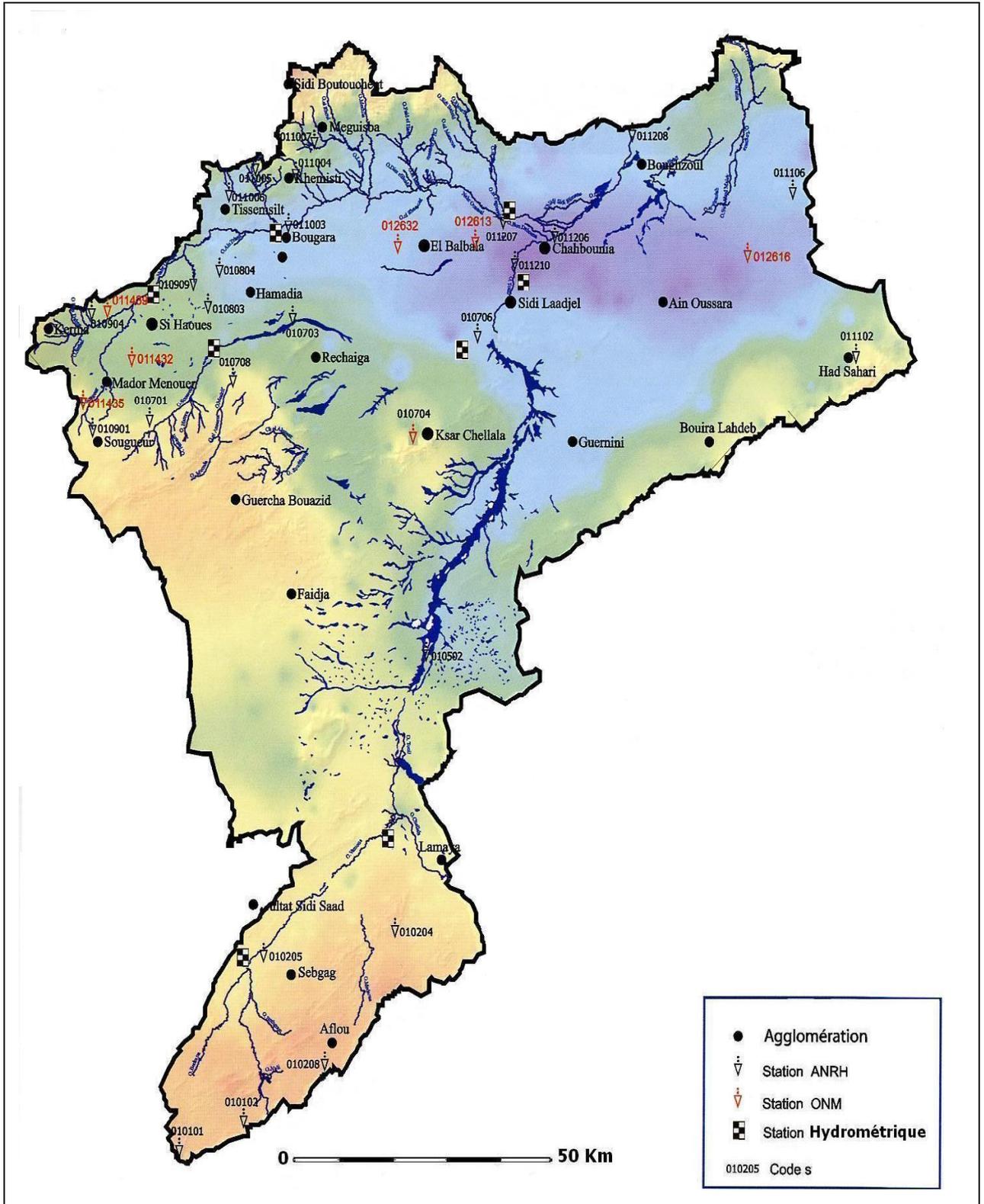


Figure 1.12 Equipement du bassin versant Chellif amont de Boughzoul

1.5 Conclusion

Le bassin versant du Chellif amont de Boughzoul présente un chevelu hydrographique faible avec un réseau de l'ordre de 1468 km d'oueds permanents et 8395 km d'oueds temporaires, le principal cours d'eau est oued Touil qui draine une superficie de 11460 km², orienté du sud au nord jusqu'à sa confluence avec Nahr Ouassel, qui coule de l'est vers l'ouest, pour donner naissance au niveau du barrage de Boughzoul au plus long oued d'Algérie, le Chellif.

Le barrage de Boughzoul devra jouer un rôle structurant dans l'aménagement de la future ville lac, mais en raison de sa fonction primitive de décanteur pour le Barrage de Ghrib depuis 1934, la vase n'a pas cessé d'envahir les espaces et finit par combler les deux tiers de sa capacité, ce qui risque d'entraver sérieusement sa nouvelle mission.

Dans ce qui va suivre, on va essayer de répondre à quatre questions qui résument l'essentiel de notre étude :

- Quel est le taux exact d'envasement du barrage de Boughzoul, et quelle sera sa durée de vie ?
- Quels sont les mécanismes qui sont à l'origine de l'envasement ?
- Quels sont les apports liquides et solides qui alimentent le barrage et d'où proviennent-ils ?
- Où se trouve la zone potentiellement productive de sédiments et quels sont les remèdes ?

CHAPITRE 2

ENVASUREMENT DES BARRAGES EN EXPLOITATION

2.1 Introduction

Laissés à leur cours naturel, les cours d'eau transportent progressivement jusqu'à la retenue des quantités importantes de sédiments en fonction du ruissellement des eaux de pluie.

Au moins 100 Mm³ de sédiments se déposent chaque année dans les retenues des pays du Maghreb, entraînant une diminution des disponibilités en eau potable et d'irrigation. Au total l'envasement moyen annuel est estimé à 50 Mm³/an pour le Maroc, 30 Mm³/an pour la Tunisie et 20 Mm³/an pour l'Algérie. (B.Remini) [6]

L'inventaire du comblement des barrages-réservoirs par le comité National Algérien des grands barrages effectué en 1987, indique un taux d'environ 25%. [7]

La plupart des retenues se combent ainsi progressivement. A terme, cela compromet leur bon fonctionnement et leur rentabilité, c'est pourquoi on est amené à vouloir étudier puis évaluer ces sédiments pour dégager la stratégie de lutte à adopter.

En vue d'assurer une durée de vie adéquate à ces ouvrages, et appréhender à juste titre leur durée réelle, la connaissance approfondie de leur alluvionnement sera analysée comme un paramètre déterminant de l'étude hydrologique.

L'ampleur de l'envasement est étroitement liée à l'érosion ainsi qu'aux régimes pluvial et hydrologique. En effet divers paramètres conditionnent la formation des transports de matières terreuses et leurs évolution dans le temps dont, la morphométrie du bassin versant, le caractère torrentiel des précipitations, la période de l'année dans laquelle s'effectue le transport solide, la nature géologique du bassin versant, la lame d'eau ruisselée et le couvert végétal. Tous ces paramètres liés, entrent simultanément en jeu et il est difficile d'en isoler un pour qu'il soit seul à prendre en considération pour expliquer le phénomène d'érosion et de transport solide.

A travers ce qui suit nous essayons de :

- Quantifier l'envasement des retenues des barrages en exploitation dans le bassin, particulièrement celui de Boughzoul.
- Estimer la durée de vie du barrage de Boughzoul par la prévision de l'envasement de sa retenue.
- Les conséquences de l'envasement
- Les mesures de lutte à adopter

2.2 Description générale de l'envasement

2.2.1 Identification et classification des vases

On désigne habituellement sous le nom « **vase** » une grande variété de matériaux fins d'origine minérale, plus au moins cohésifs et argileux, contenant un pourcentage de pré-colloïdes et de colloïdes plus ou moins important de matières organiques en suspensions, dans les eaux marines ou dans certaines eaux fluviales. Ce matériau forme un réseau très lâche de "flocons" décantés sur les fonds, les vases seront soumises à un tassement très lent et leur rigidité (ou cohésion) variera très rapidement en fonction de leur teneur en eau présentant tous les états physiques possibles ; liquides, visqueux ou solides. On trouve ces vases principalement dans les lits des rivières et surtout les estuaires, au fond des lacs et des océans.

Il existe plusieurs classifications des sédiments suivant leur granulométrie. Selon la terminologie adoptée généralement en mécanique des sols, la fraction cohésive des vases est appelée " argile ", elle correspond en moyenne aux particules de taille inférieure à 2 microns. La fraction non cohésive des vases de taille inférieure à 20 Microns est appelée "Silt " ou "limon".

2.2.2 Les apports solides aux retenues

Les eaux des cours d'eau transportent les sédiments sous deux modes, le charriage et la suspension objet du chapitre qui va suivre.

Ces matériaux solides proviennent essentiellement de l'érosion qui sévit dans les bassins versants grâce au ruissellement concentré des eaux de pluie. On comprend donc que les matières solides ne sont pas apportés de façon continue toute l'année hydrologique, mais essentiellement lors des crues. Les concentrations d'éléments en suspension concernent les sédiments fins (sable fin silts et argile) des rivières sont d'environ 2g/l en moyenne en temps normal et peuvent atteindre fréquemment 20 g/l en crue. Cette valeur, multipliée par le débit liquide donne les débits solides transportés en suspension, lors des crues exceptionnelles, ils sont couramment 100 fois plus élevés qu'en temps normal. C'est en négligeant cette remarque qu'on a parfois sous-estimé l'envasement par le passé. La sédimentation dans les retenues est due au piégeage de ces sédiments de rivières dans les eaux calmes du lac.

2.2.3 Distribution des sédiments dans les retenues des barrages

2.2.3.1 Définition des courants de densité

Les courants de densité appelés parfois courants de gravité, sont des phénomènes qui se créent naturellement ou artificiellement. Ils correspondent aux intrusions de fluides dans d'autres, sous des conditions bien précises.

Ces écoulements stratifiés, mouvement de deux ou plusieurs masses de fluides miscibles ou non, ont des densités différentes dues à la variation de la température ou à la présence de matières solides en suspension ou encore de matières dissoutes. Ces écoulements se propagent en conservant leur individualité ou en se mélangeant au fur et à mesure.

2.2.3.2 Propagation des courants de densité dans la retenue

Dans la zone de plongée, les eaux de crues abandonnent les sédiments grossiers dans les parties amont de la retenue sous forme d'un cône. Les eaux chargées constituent un véritable écoulement sous lacustre sans se mélanger aux eaux claires de la retenue et progressent jusqu'au barrage, en suivant le talweg.

Si le cours d'eau est de faible pente avec un apport solide plus ou moins important, débouche dans une retenue de type lac, telle que Boughzoul, l'élargissement brusque de la vallée représente une zone de dépôt et de disparition des courants de densité. Dans ce cas la distribution des sédiments se fait par décantation des particules fines dans tous les endroits de la retenue et par charriage des particules grossières dans la partie amont du réservoir.

2.3 Mécanisme de l'envasement

2.3.1 Comportement des sédiments grossiers

Les eaux des rivières arrivant dans les eaux claires de la retenue sont freinées dans la zone du remous, qu'on peut en général caractériser par la présence d'objets flottants. Elles perdent là leurs matériaux grossiers, qui vont former un delta en queue de retenue. Ce delta, de surface limitée, mais de hauteur relativement grande, présente une pente raide (talus naturel des sédiments) à sa limite aval et douce à la surface.

Il s'étend en amont de la limite des eaux calme en rehaussant les lignes d'eau à l'amont, et progresse vers la retenue avec le temps au fur à mesure des apports.

2.3.2. Comportement des sédiments fins

Dans la zone du remous, les eaux turbides entrant dans la retenue forment avec les eaux claires de celles-ci un front plus au moins net et plus ou moins vertical,

DUQUENNOIS désigne deux cas :

1^{er} cas : Si l'écoulement amont est torrentiel, les eaux chargées, plongent au fond de la retenue et s'y écoulent sous forme d'un courant de turbidité, de densité supérieure à celle des eaux claires. Le débit de ce courant de densité est supérieur au débit entrant en raison de la dilution dans la zone du remous qui est fortement turbulente

2^{eme} cas: Si l'écoulement amont est fluvial, il y a toujours une tendance à l'écoulement des eaux au pied du front avec contre-courant d'eau claire à la surface. Mais il ne se forme un véritable courant de densité que pour les débits et concentrations des apports suffisamment élevés. Si ce n'est pas le cas et que les apports et les eaux du lac sont à des températures voisines, le front est discontinu et sujet à des fluctuations importantes. L'écoulement amont se disperse alors plus au moins dans la retenue.

2.4 Influence des différentes caractéristiques des retenues sur le mécanisme de l'envasement

2.4.1 Influence de la topographie de la retenue

La topographie de la retenue modifie l'envasement en modifiant les conditions d'écoulement des courants. Cet effet, bien peu étudié est difficile à quantifier. Il est probablement déterminant pour la localisation des dépôts. En général, plus la forme de la retenue est tortueuse, plus l'envasement se déplace vers l'amont.

2.4.2 Présence de la végétation

La végétation existante en fond de retenue peut retenir une grande partie des sédiments, de plus, elle accélère la consolidation des vases par la succion de l'eau interstitielle.

2.4.3 Présence d'affluents

Des affluents se jetant dans le réservoir (lac) de la retenue perturbent parfois le mécanisme classique d'envasement, notamment s'ils sont eux mêmes chargés de matière en suspension.

2.4.4 Influence du mode d'exploitation du réservoir

La mise en mouvement des sédiments dans la partie découverte dans la retenue, ou la rivière va en général retrouver son lit d'origine, ou en tout cas divaguer en creusant son chenal parmi les alluvions précédemment déposées.

De plus des talus glissent, soit du fait de l'érosion progressive due au rétablissement du cours d'eau, soit simplement parce que les pentes d'équilibre des talus sont plus faibles hors d'eau.

L'exploitation de la retenue à niveau bas déplace vers l'aval l'ensemble de l'alluvionnement. Ceci explique que dans la pratique on n'observe pas toujours un classement granulométrique régulier en fonction de la distance au barrage. L'utilisation fréquente des vidanges de fond contribue à limiter l'envasement, soit en favorisant l'écoulement des courants de densité, soit en ayant un effet de chasse.

2.5 Piégeage des sédiments dans la retenue

Arrivant dans la retenue, les particules solides seront piégées dans les eaux calmes, elles se tassent et se consolident diminuant ainsi progressivement sa capacité de stockage.

L'envasement des retenues est définie comme étant l'accumulation successive des sédiments transportés par les cours d'eau dans la retenue.

L'organigramme de la figure 2.1 donne les étapes du processus d'envasement des retenues [6]

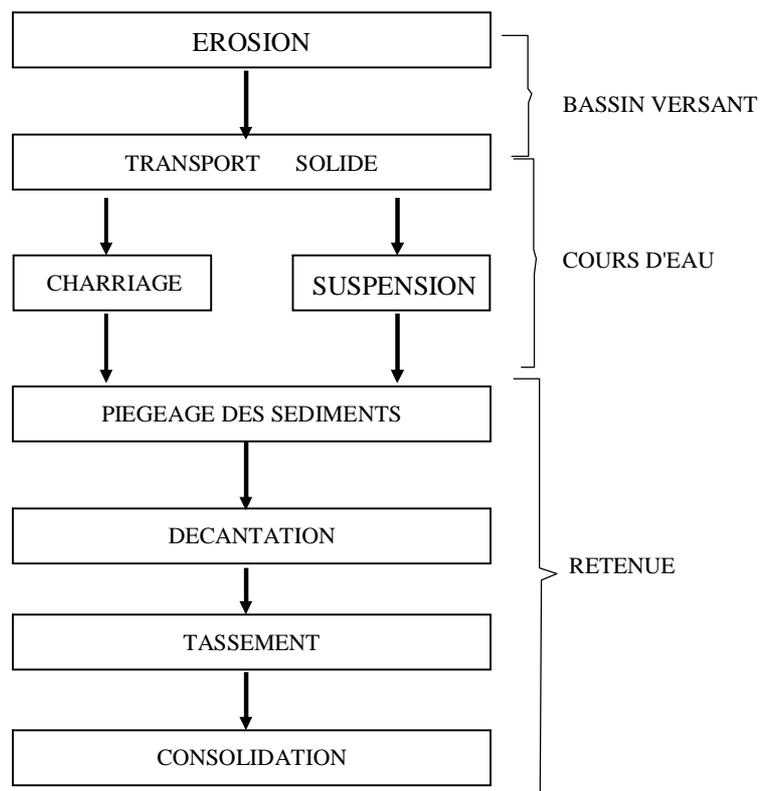


Figure 2.1 Processus de l'envasement

2.6 Méthodes d'évaluation de l'envasement

Les diverses méthodes directes utilisées en vue de déterminer l'envasement des retenues de barrages sont :

- Méthode Bathymétrique
- Méthode turbidimétrique
- Méthode stéréophotogrammétrique
- Méthode de vidange et de remplissage
- Utilisation des courbes de dégradation du sol en fonction des surfaces des basins versants.

a) Procède bathymétrique

Les mesures directes de profondeurs donnent des résultats très précis mais, au-delà d'une dizaine de mètres de hauteur d'eau leur exécution devient laborieuse. Aussi a-t-on recours aux mesures indirectes que permettent les bathymètres.

b) Méthode turbidimétrique

Durant chaque crue, à chaque instant, on mesure la hauteur d'eau à la station, à laquelle correspond un débit instantané (déterminé à partir de la courbe d'étalonnage). La concentration à cet instant est mesurée par double pesée au laboratoire. En multipliant cette concentration par le débit liquide instantané, on obtient le débit massique solide instantané. Et durant toute la crue, on trace le turbidigramme dont le planimétrage donne les masses solides transitées toute l'année, durant toutes les crues.

c) Méthode stéréophotogrammétrique

L'un des procédés actuels les plus précis pour établir les données de base est la stéréophotographie aérienne, complétée au sol par un travail de triangulation et de stéréopréparation topographique. L'erreur commise par ce procédé dans l'évaluation des coordonnées des points particuliers est de l'ordre de 0.10m. Une telle précision nous a permis d'utiliser cette technique pour déterminer et mesurer l'envasement des retenues par répétition de photographies semblables à des intervalles de temps suffisants, de l'ordre de cinq ans. Cette méthode est particulièrement utilisée en période de sécheresse quand la retenue est à niveau bas.

d) Méthode de vidange et remplissage

La vidange d'un barrage, rend compte de la quantité de vase présente dans la retenue. En effet l'eau stockée dans la retenue à une date déterminée correspondant au volume utile donné par la cote normale, et en l'absence de tout apport peut être mesurée de différentes façons (échelle limnimétrique, vanne de vidange) une fois déduite du volume utile correspondant à la cote normale depuis la mise en service du barrage, on aura le volume de vase recherché.

En général, cette méthode est utilisée pour les retenues ayant une faible capacité.

e) Extrapolation de la courbe de la dégradation

Cette méthode a été largement utilisée par les ingénieurs conseils afin d'estimer le taux d'envasement et pouvoir prévoir le volume nécessaire à la tranche morte. Elle permet d'apprécier le taux de dégradation à partir des courbes de dégradation élaborées sur la base de données cartographiques à l'échelle régionale.

2.7 Présentation des barrages en exploitation dans le bassin

2.7.1 Barrage de Dahmouni

a) Objectif

Afin de répondre aux besoins industriels de la ville de Tiaret, la réalisation du barrage de Dahmouni fut lancée en 1982 et achevée en 1987 date de sa mise en eau. (Figure 2.2)



Figure 2.2 Barrage Dahmouni

b) Localisation

Le barrage de Dahmouni se trouve sur l'oued Nahr ouassel.

Il est situé à 8 km environ du village Dahmouni (Tiaret) aux coordonnées U.T.M suivantes :

$$\begin{aligned} X &= 369740.626 \text{ m} \\ Y &= 3920467.723 \text{ m} \\ Z &= 945.271 \text{ m} \end{aligned}$$

c) Caractéristiques hydrologiques

- Surface du bassin versant : 425 km²
- Précipitation moyenne (1986/2006) : 305.9mm
- Apport liquide annuel moyen théorique (1913/1968) : 23 Mm³
- Apport solide annuel moyen : 0.1 Mm³

d) Caractéristiques techniques

- Digue en terre
- Hauteur 35 m
- longueur de la crête 885 m

e) Levé bathymétrique

Tableau 2.1 Levé bathymétrique du barrage de Dahmouni [8]

Années	Situation	Nombre d'années d'exploitation	Capacité en Mm ³	Perte annuelle en Mm ³	Taux d'envasement en %
1987	Mise en eau	18	41	0.082	3.63
2005	Levé bathy		39.51		

2.7.2 Barrage colonel Bougara

a) Objectif :

Il est destiné à stocker 13 Hm^3 pour des fins d'irrigation.

b) Localisation :

Le barrage de C.Bougara (Figure 2.3) se situe à 40 km en aval du barrage de Dahmouni sur le même cours d'eau, et à une dizaine de km au sud de la ville de Tissemsilt, aux coordonnées U.T.M suivantes :

$$\begin{aligned} X &= 403781.86 \text{ m} \\ \text{C.Bougara} \\ Y &= 3936192.251 \text{ m} \\ Z &= 818.226 \text{ m} \end{aligned}$$



Figure 2.3 Barrage

c) Caractéristiques hydrologiques :

- Bassin versant : Sur les 1000 km^2 que représente la superficie du bassin versant, le barrage Colonel Bougara ne contrôle que la moitié soit 454 km^2 , le reste est contrôlé par le barrage de Dahmouni en amont.
- Précipitation moyenne (1972/2001 station Bougara) : 356.4 mm/an
- Apport liquide annuel moyen : 9 Mm^3
- Apport solide annuel moyen estimé: 38000 m^3

d) Caractéristiques techniques :

- Digue en terre
- Hauteur de la digue : 20 m
- Longueur de la crête : 300 m

e) Levé bathymétrique :

Tableau 2.2 Levé bathymétrique du barrage c. Bougara [9]

Années	Situation	Nombre d'années d'exploitation	Capacité en Mm^3	Perte annuelle en Mm^3	Taux Envaselement en %
1989	Mise en eau	16	12.92	0.1	12
2005	Levé bathy		11.31		

2.7.3 Barrage de Boughzoul

a) Objectif :

Le barrage est destiné à :

- la protection du barrage Ghrib en aval par l'écêtement des crues
- Assurer la décantation pour diminuer les apports solides et réduire l'envasement de barrage Ghrib.
- Réservoir complémentaire de stockage d'eau

Parmi les objectifs futurs :

- Élément structurant de la ville lac.
- Maintenir une biodiversité pérenne
- Assurer les activités nautiques et récréatives

b) Localisation :

Le barrage de Boughzoul se situe à 80 km au sud de la wilaya de Médéa, (Figure 2.4) sur le territoire de la commune de Boughzoul futur siège de la nouvelle ville lac; il se situe aux coordonnées U.T.M :

$$X = 480072.671\text{m}$$

$$Y = 3955803.338\text{m}$$

$$Z = 656.211\text{m}$$

c) Caractéristiques hydrologiques :

- La surface du bassin versant est de 19645 km²
- La précipitation moyenne (1982/2006) : 216.9mm
- Apport liquide annuel moyen 45 Mm³
- Apport solide annuel moyen 0.61 Mm³

d) Caractéristiques techniques

- Digue principale déversante en béton et digue latérale en terre (Figure 2.5)
- Hauteur 10m
- Longueur de la crête 450m
- Digue sud de 3000m de longueur (Figures 2.6)

e) Levé bathymétrique:

Tableau 2.3 Levé bathymétrique du barrage de Boughzoul [1]

Année	Capacité en Mm ³	Nombre d'années d'exploitation	Perte de capacité en Mm ³	Perte annuelle en Mm ³	Taux d'envasement en %
1934	55	71	34.37	0.489	63
1956	50				
1965	41				
2005	20.27				

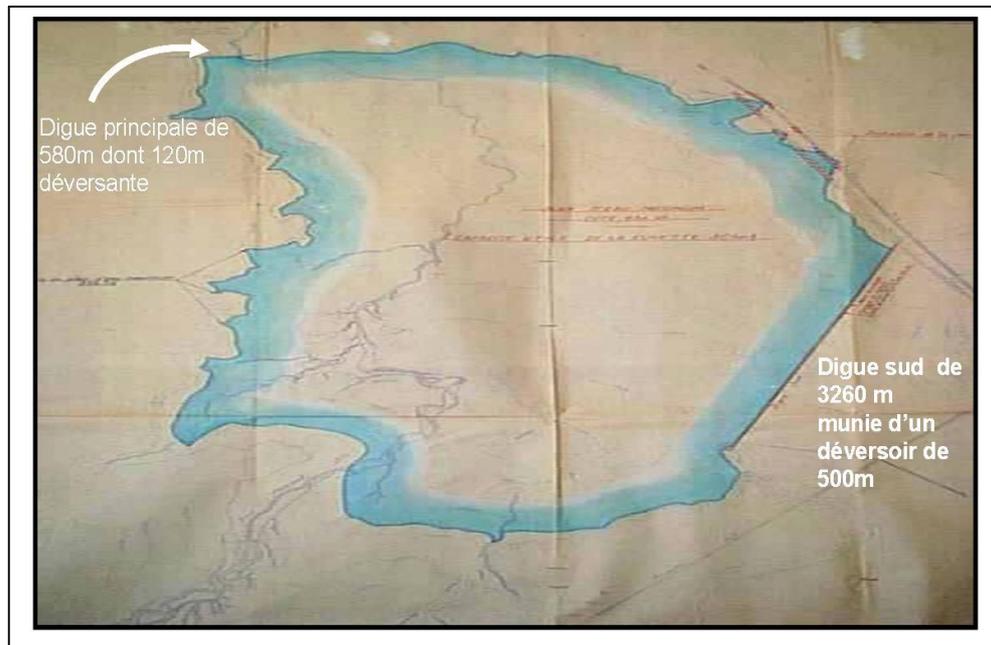


Figure 2.4 Lac et Ouvrages du barrage de Boughzoul

Remarque

- Les levés bathymétriques de 1934 à 1965 sont tirés de la monographie du barrage [19]



Figure 2.5 Digue principale du barrage de Boughzoul



Figure 2.6 Digue sud du barrage de Boughzoul

2.8 Pr evision de l'envasement de la retenue de Boughzoul

La pr evision de l'envasement est indispensable dans l'étude de faisabilité d'un barrage, car elle permet la pr ed etermination de son volume mort.

On peut également y avoir recours dans la gestion et l'exploitation des barrages pour se rendre compte de l'évolution des dépôts et des apports en sédiments dans le temps ainsi que l'actualisation de la courbe hauteur - capacité .

En outre, le coût exorbitant d'une bathymétrie périodique incite les exploitants à adopter la méthode empirique pour minimiser les frais.

- Méthode de Orth :

Orth en 1934, est parmi les premiers à avoir étudié la pr evision de l'envasement, il suppose que la capacité résiduelle varie dans le temps en fonction d'une loi à décroissance exponentielle. La formule est largement utilisée en Algérie pour la pr evision des dépôts sédimentaires dans une retenue. Saidi en 1991, en utilisant 18 levés bathymétriques des barrages algériens a pu dégager une formule de pr evision de l'envasement pour chaque barrage ce qui se traduit par :

$$Z_t = V_0[1 - (1 - Z_1/V_0)^t]$$

Avec : Z_t : volume des sédiments dans la retenue après "t" ans d'exploitation

V_0 : Capacité initiale du réservoir en Mm^3

Z_1 : Envasement moyen annuel en Mm^3

t : Nombre d'années d'exploitation.

- Méthode de B.Remini et W.Hallouche :

Les travaux récents de B.Remini et W.Hallouche (Larhyss 2005) [10] dans ce domaine méritent d'être soulignés, en effet, la synthèse de plus de 60 barrages Magr bins dont 20 algériens s'est distingu e par ses résultats probants dans l'estimation du taux d'envasement :

$$T_{env} \% = \frac{V}{V_0} = 1.6228 t^{0.8707}$$

Avec

T : Taux d'envasement

t : Nombre d'années d'exploitation.

2.8.1 Applications numériques :

Les résultats de la bathymétrie du barrage de Boughzoul (Tableau 2.3) forment une base de donnée appréciable pour trancher en faveur de la formule qui donnerait la meilleure prévision.

a- ORTH

$$Z_t = V_0 [1 - (1 - Z_1 / V_0)^t]$$

En adoptant la période 1934 à 2005 soit 71 ans d'exploitation

$$Z_t = 55 [1 - (1 - 0.49/55)^{71}]$$

$$Z_t = 25.80 \text{ Mm}^3$$

$$\text{Tenv} = Z_{2005} / V_0 = 25.8 / 55 = 47\%$$

$$\text{Tenv} = 47\% \ll 63\% \text{ (bathymétrie)}$$

b- B.Remini et W.Hallouche

$$\text{Tenv \%} = 1.6228 t^{0.8707}$$

$$\text{Tenv \%} = 1.6228 (71)^{0.8707}$$

$$\text{Tenv \%} = 66\%$$

Comparé à la bathymétrie ce taux d'envasement se rapproche sensiblement de la réalité confortant ainsi notre choix de la formule de Remini-Hallouche pour la prévision.

Tableau 2.4 Récapitulation des résultats

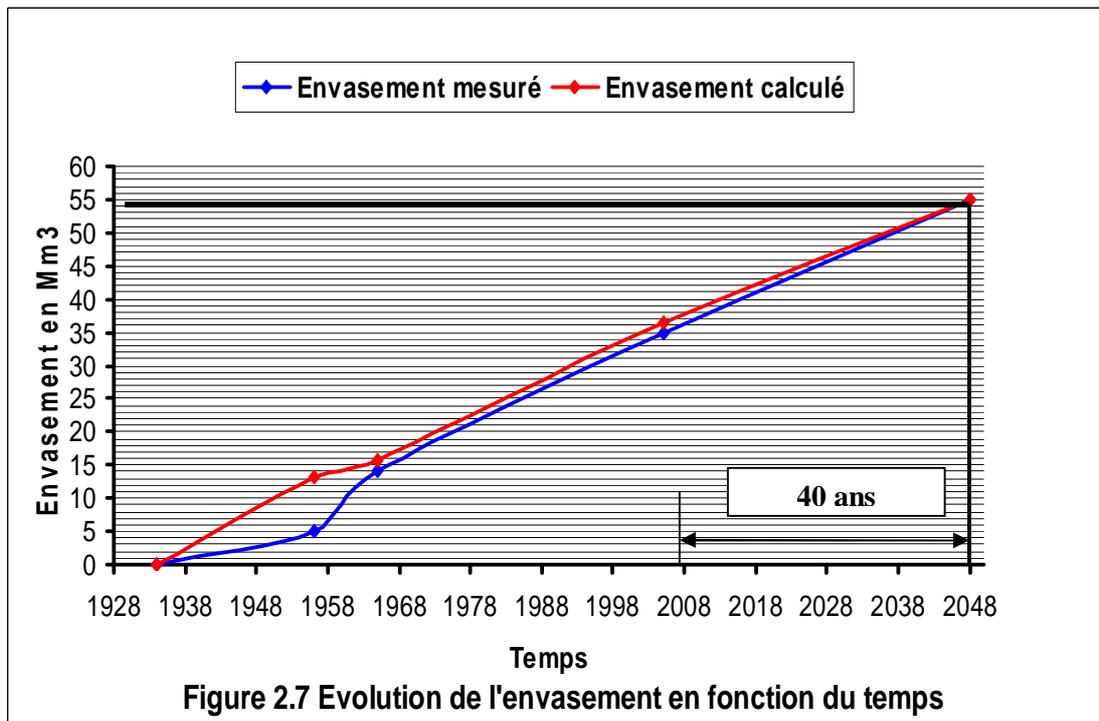
Méthodes	Actif	Volume d'envasement en 2005 en Mm3	Taux d'envasement en %
ORTH	71	25.8	47
Remini et Hallouche	71	36.3	66
Bathymétrie	71	34.65	63

2.8.2 Synthèse :

Au vu du taux d'envasement calculé par les deux méthodes, c'est celle de B.Remini-Hallouche [66%] qui cadre avec les résultats de la bathymétrie [63%], c'est pourquoi on a retenu cette méthode pour l'estimation de la durée de vie du barrage de Boughzoul déjà comblé à 63% (bathymétrie 2005).

Tableau 2.5 Evolution de l'envasement en fonction du temps

Années	1934	1956	1965	2005	2046	2048
Envasement mesuré en Mm ³	0	5	14	34.73	55	55
Envasement calculé en Mm ³ (Remini-Hallouche)	0	13.16	15.73	36.3	54.31	55



En conclusion, c'est en 2048 que le barrage de Boughzoul sera totalement envasé, après une durée d'exploitation de 40 ans à compter de 2008, ce qui est susceptible de remettre en cause le choix de la variante ville lac, si aucune mesure n'est prise pour atténuer la vive allure du phénomène.

2.9 Conséquences de l'envasement des barrages

Parmi les problèmes majeurs que pose l'envasement des retenues des barrages, on peut retenir ce qui suit :

2.9.1 Réduction de la capacité de la retenue

C'est la conséquence la plus dramatique de l'envasement ; chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable au détriment de celui de la retenue comme c'est le cas pour Boughzoul qui risque à même de compromettre le projet ville lac. (Figure 2.8)



Figure 2.8 Etat d'envasement de la retenue de Boughzoul

2.9.2 Obturation des organes de vidange

Un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidange de fond.

Le blocage de la vanne sud du barrage de Boughzoul (Figure 2.9) ampute la retenue d'une importante quantité d'eau en causant beaucoup de nuisance par inondation du voisinage.



Figure 2.9 Blocage de la vanne de la digue sud du barrage de Boughzoul

2.9.3 Sécurité de l'ouvrage

En plus de la diminution de la capacité du réservoir, l'envasement pose celui de la stabilité de l'ouvrage, on sait que pour une variation linéaire de la hauteur de la vase, la poussée des terres progresse au carré de la hauteur.

2.9.4 Envasement des canaux d'irrigation

Le dépôt des sédiments dans une retenue de barrage destinée à l'irrigation, pose le problème de comblement du réseau des canaux d'irrigation se trouvant à l'aval du barrage, en effet dans les pays arides et semi-arides, l'irrigation se fait généralement par de l'eau chargée en sédiments, c'est ainsi que ces particules fines vont se déposer dans les canaux, réduisant ainsi leurs sections mouillées et par conséquent le débit d'eau véhiculé.

2.9.5 Dégradation de la qualité de l'eau

L'aptitude des sédiments à la fixation des produits chimiques et leur transport vers les retenues des barrages, génère l'eutrophisation des eaux qui consiste en d'autres termes à l'enrichissement de l'eau en sels minéraux (Nitrates et phosphates notamment), entraînant des déséquilibres écologiques, comme la prolifération de la végétation aquatique et l'appauvrissement en oxygène dissous du milieu.

Par ailleurs le blocage du passage de la lumière par les sédiments en suspension affecte le phénomène de photosynthèse vital pour la flore.

2.10 Actions de lutte contre l'envasement

Il existe fondamentalement deux types de mesures pour lutter contre l'envasement des mesures curatives et des mesures préventives.

2.10.1 Mesures curatives

Parmi ces mesures on peut citer :

a) La technique de chasse

La technique de chasse consiste à évacuer une quantité des sédiments par les pertuis de vidange à l'arrivée des crues.

b) Soutirage des courants de densité

La forte concentration en sédiments dans les cours d'eau surtout en période de crues et la forme géométrique de la cuvette (type canal) donnent naissance aux courants de densité à l'entrée d'une retenue et peuvent se propager jusqu'au pied du barrage.

L'ouverture des vannes de fond au moment opportun peut évacuer une forte quantité de sédiments.

c) Surélévation de la digue

Cette méthode consiste, lorsque le taux de comblement est avancé, à augmenter la hauteur de la digue d'une taille variable, permettant la constitution d'une réserve complémentaire pour compenser la perte de volume occupé par la vase.

d) Réalisation des barrages de décantation

La meilleure façon d'éviter l'envasement, c'est d'empêcher la vase d'arriver jusqu'au barrage, cela peut se faire par la création de retenues pour la décantation des apports solides, ce qui revient à construire un autre barrage en amont.

La réalisation du barrage de Boughzoul en amont de celui de Ghrib était destinée pour les mêmes fins, ce qui explique son taux d'envasement élevé.

e) Dragage de la retenue

La technique de dragage quoique onéreuse mais reste indispensable pour les barrages qui menacent ruine sous l'effet des poussées des terres. La rareté des sites pour la réalisation de nouveaux ouvrages constitue une raison supplémentaire pour l'adoption de cette technique.

2.10.2 Mesures préventives

Les mesures curatives ont été expérimentées en Algérie mais à cause de l'importance de l'envasement ne peuvent suffire. Techniquement parlant, le nombre de sites adéquats ainsi que les possibilités de surélévation sont limités. Dans le petit barrage réservoir de Fergoug des dragages par succion éliminent depuis de nombreuses années environ 1.5 Mm^3 de sédiments par an, ce qui a permis de sauvegarder de 3.5 à 6 Mm^3 sur 18 Mm^3 de volume de rétention. La généralisation du procédé se heurte au problème des produits du dragage et au coût spécifique élevé.

Le dévasement par chasse d'eau tel qu'il est pratiqué est également inadéquat, car ce procédé nécessite de grandes quantités d'eau faisant souvent défaut à cause d'un bilan hydrologique déficitaire.[Gomer] [7]

Les mesures préventives telles qu'illustrées dans le chapitre 5, demeurent incontournables pour lutter efficacement contre l'érosion et préserver nos retenues contre l'envasement et par conséquent garantir une mobilisation accrue de nos ressources hydriques, base de toute action de développement telle que l'édification de la ville lac qui reste tributaire des résultats de cette lutte.

2.11 Conclusion

Les grandes quantités de sédiments qui sont arrachées et exportées de l'amont du bassin vers l'aval, affectent de plein fouet les ouvrages hydrauliques par l'envasement rapide des retenues dont les conséquences sont : la réduction de la capacité des barrages, l'obturation des organes de vidange, la sécurité de l'ouvrage, l'envasement des canaux d'irrigation et la dégradation de la qualité de l'eau. La situation alarmante des barrages algériens en témoigne.(REMINI [6])

Le barrage de Boughzoul n'échappe pas à ce constat puisqu'il enregistre une perte de capacité annuelle de 0.49 Mm^3 ce qui porte son taux d'envasement à 63% depuis 1934 date de sa mise en eau. (Levé bathymétrique 2005 [1]) .

Les sédiments déposés annuellement au fond de la retenue réduisent substantiellement sa capacité de mobilisation ainsi que sa durée de vie. Avec cette allure et d'après les prévisions, le barrage de Boughzoul sera comblé dans 40 ans tout au plus, et ceci à compter de l'année 2008, ce qui compromet sérieusement l'avenir du projet de la ville lac censée accueillir 350000 habitants en l'an 2025.

Pour appréhender le phénomène d'envasement qui puise, ses sources dans les sédiments transportés par les écoulements superficiels, nous allons essayer d'arpenter le sillage de ces particules pour se rendre compte des forces mobilisatrices contribuant au déchaînement de ces inexorables masses inertes qui gisent dans la retenue et tenter d'agir efficacement pour infléchir cette tendance.

CHAPITRE 3

TRANSPORT SOLIDE

3.1 Introduction

Un cours d'eau transporte des matériaux granulaires qui proviennent soit de l'ensemble de la surface du bassin versant soit du fond ou des berges du lit mineur ainsi les matériaux observés au niveau d'une section de mesure peuvent être produits par l'érosion de surface appelée érosion aréolaire ou par érosion du fond du lit et des berges, c'est l'érosion linéaire.

L'érosion linéaire persiste même lorsque la pluie cesse. Elle met en œuvre des forces plus considérables que l'érosion aréolaire et peut donc mobiliser des matériaux nettement plus grossiers en période de crues.

Les crues de l'automne et du printemps sont responsables de l'essentiel du transport solide dans les bassins versants du Tell algérien dominé par un climat semi aride. En effet, pendant l'été connu pour ses chaleurs intenses, le sol se dessèche, se fissure, se fragmente et voit son couvert végétal réduit, ce qui permet aux premières averses de l'automne de laver le sol de ses éléments fins détachés. Pendant le printemps qui succède à la saison hivernale froide et pluvieuse les crues coïncident avec des versants saturés et déblayés.

3.2 Définition de l'érosion

L'érosion est un phénomène aussi vieux que la terre, elle désigne l'action du vent ou de l'eau qui use le relief par la dégradation des sols, des roches et des terres cultivés. Elle est dite érosion éolienne quand l'agent dégradant est le vent et hydrique si l'eau, la glace, la pluie ou les vagues sont à l'origine.

L'érosion est souvent amplifiée par les activités humaines qui modifient la nature des sols : Urbanisation, déboisement, défrichage, surpâturage, labours dans le sens de la pente.

3.3 Types d'érosions

Il existe deux types d'érosions

3.3.1 Erosion éolienne

Le vent exerce sur les particules solides au repos une pression sur la surface exposée au flux d'air appliqué au centre de gravité, auquel s'oppose un frottement centré sur la base des particules. Ces deux forces constituent un couple tendant à faire basculer et rouler les particules lourdes (0.5 à 2 mm), de plus la différence de vitesse entre la base et le sommet des particules provoque leur aspiration vers le haut. Les particules les plus légères s'élèvent à la vertical jusqu'à ce que le gradient de vitesse ne les portent plus, elles retombent alors, poussées par le vent, suivant une trajectoire subhorizontale. En retombant ces grains de sable transmettent leur énergie à d'autres grains comme un jeu de boules, tout en dégradant ce qui peut l'être (Heush 1988).

3.3.2 Erosion hydrique

L'érosion hydrique des sols se développe lorsque les eaux de pluie ne pouvant s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement Hortonien), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation).

Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux (Cross- Cayot 1996). Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace :

L'érosion de versant diffuse ou en rigoles parallèles et l'érosion linéaire ou concentrée de talweg. [11]

On peut la structurer en deux catégories : érosion aréolaire et érosion linéaire [12]

3.3.2.1 Erosion aréolaire ou érosion diffuse

C'est une érosion de surface qui se produit sur la totalité d'un versant et regroupe l'érosion en nappe et l'érosion en rigoles.

Ce type d'érosion peut être amplifié par l'interférence de plusieurs facteurs, entre autres les caractéristiques des pluies (intensité, durée), du sol (granulométrie, humidité initiale, teneur en matières organiques) et de la surface (inclinaison, longueur et forme de la pente, rugosité, couverture végétale).

- Erosion en nappe : Première phase de l'érosion aréolaire pendant laquelle les particules arrachées sous l'impact des gouttes de pluie (effet Splash) sont transportées par les ruissellements de surface.

Lorsqu'un versant est soumis à un événement pluvieux suffisamment intense, des particules de terre sont arrachées par effet Splash. La perméabilité du sol est alors réduite par effet de battance et un ruissellement de surface, capable de mobiliser une fraction des particules détachées, apparaît dès que le taux d'humidité du sol est assez élevé. La lame d'eau, ainsi chargée en particules très fines et qui s'écoule le long du versant, peut être interceptée par des micro rigoles, tracées généralement en travers de la pente et correspondant aux lignes de semis ou aux incisions continues provoquées par le passage des engins agricoles. Mais lorsque ces petites barrières à l'écoulement de surface sont franchies par débordement, elles s'effacent et le ruissellement suit à nouveau la pente naturelle.

- Erosion en rigole : Deuxième phase de l'érosion aréolaire, consécutive à l'érosion en nappe, pendant laquelle les écoulements chargés en particules de terre se concentrent dans les rigoles relativement bien marquées selon la pente du versant.

Si les discontinuités micro-topographiques de terrain le permettent, alors des écoulements de surface, chargés par le produit de l'érosion en nappe, se concentrent dans les rigoles orientées dans le sens de la pente. De très nombreux ruisselets peuvent ainsi se former et permettre aux particules détachées sur le versant de transiter jusqu'au bas des pentes. Lorsque la longueur de ces ruisselets est suffisante, ils se chargent aussi en éléments plus grossiers jusqu'à ce que leur capacité de transport soit atteinte.

3.3.2.2 Erosion linéaire

C'est l'érosion qui se produit lorsque l'écoulement liquide est concentré dans le lit des talwegs.

Ce type d'érosion dépend des caractéristiques géométriques et hydrauliques de l'écoulement, de son taux de matière en suspension ainsi que de la granulométrie du substrat en place. La connaissance de ces paramètres permet de déterminer la force tractrice qui agit sur le lit et qui représente l'ensemble des forces érosives. Ces forces, beaucoup plus grandes que celles qui contrôlent l'érosion aréolaire, permettent de mobiliser des grains de diamètre élevé.

On distingue :

- Erosion progressive

C'est une érosion linéaire liée à une perturbation du transit des sédiments vers l'aval, qui entraîne un déficit dans le stock de sédiments nécessaires au lit pour atteindre sa capacité de transport. Le cours d'eau se nourrit alors sur son fond et sur ses berges.

- Erosion régressive

C'est une érosion qui est due à une accélération de l'écoulement et qui se propage vers l'amont.

3.4 Quantification de l'érosion

a) Formule de Henin '1950'

Cette formule symbolise la relation existante entre l'érosion pluviale et les facteurs susceptibles de la favoriser ou de la limiter. La quantification de l'érosion spécifique 'Es' est donnée par la formule suivante :

$$Es = \frac{Ip.Is}{K.Ve}$$

Ip : Intensité des précipitations

I : Pente du bassin versant

Les facteurs Ip et I favorisent l'érosion

S : Susceptibilité des sols

K : Perméabilité

Ve : Végétation

Les facteurs S, K et Ve limitent l'érosion

b) Formule universelle de Wischmeier '1959'

Le modèle empirique de perte en terre de Wischmeier et Smith (U.S.L.E) est élaboré, vingt ans après la mise en place des essais d'érosion en parcelle dans une bonne dizaine d'états d'Amérique du nord. Il existait une accumulation d'un grand nombre de données sur l'érosion dont il convenait de faire la synthèse. En 1958, Wischmeier, statisticien du service de conservation des sols fût chargé de l'analyse et de la synthèse de plus de 10000 mesures annuelles de l'érosion sur parcelles et sur petits bassins versants dans 46 stations de grande plaine américaine. L'objectif de Wischmeier était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte antiérosives de choisir le type d'aménagement nécessaire pour garder l'érosion en dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production.

$$A = R (K.Ls.C.P)$$

A : Perte de terre (t/ha)

R : Indice caractérisant l'agressivité de la pluie

K : Indice caractérisant la susceptibilité du sol à l'érosion

Ls : Indice de pente, permettant de comparer les conditions topographiques locales à des conditions standards.

C : Indice de culture, permet de tenir compte du degré de protection du sol par le couvert végétal.

P : Indice de conservation du sol

c) Formule de Grivilovic '1960'

Il a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnel à la température, à la pluie et à un coefficient d'érosion, l'équation est donnée par l'expression suivante :

$$Es = 3.14 \cdot T \cdot Po \sqrt{Z}^3$$

Es : érosion spécifique dans le bassin versant (t/km².an)

T : Coefficient de température

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0.1$$

t₀ : Température moyenne mensuelle

Po : Pluie annuelle en mm

Z : coefficient d'érosion

Avec

$$Z = y \cdot [x.a] \cdot (\delta + \sqrt{I_{moy}})$$

Y : Valeur du coefficient de la résistance du sol dû à l'érosion. Il dépend de la roche mère, le type de sol et du climat.

[x.a] : coefficient de régularisation du bassin versant, se rapportant à la protection des sols, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosives liées aux conditions naturelles. Il est aussi tabulé.

δ : Equivalant numérique des processus visibles et nettement prononcés dans le bassin versant.

I_{moy} : Indice de pente moyenne du bassin versant.

d) Formule de Tixeront ' 1960'

$$Es = [S_1 \cdot Ta_1 + S_2 \cdot Ta_2 + S_3 \cdot Ta_3 + \dots \dots \dots S_n \cdot Ta_n]$$

Avec

Es: Erosion spécifique (t/km²/an)

Ta₁ : Taux d'abrasion en fonction de la perméabilité du sol dans les sous bassins
en t/ km²

S : Superficie totale du bassin versant en km²

S₁, S₂, S₃ : Superficies des sous bassins versants en km²

Si on suppose que la totalité du bassin versant possède une même perméabilité.

On aura :

$$E_s = K \cdot L_e$$

L_e : Lamme d'eau ruisselée moyenne interannuelle en mm

K : Coefficient qui tient compte de la perméabilité des terrains

$K = 8.5$ pour les terrains à perméabilité élevée

$K = 75$ pour les terrains à perméabilité moyenne à élevée

$K = 350$ pour les terrains à perméabilité faible à moyenne

$K = 1400$ pour les terrains à perméabilité faible

e) Formule de Fournier '1960'

$$Q_s = \frac{1}{36} \left[\frac{P}{P_a} \right]^{2.65} \cdot \left[\frac{H_{moy}^2}{S} \right]^{0.46}$$

Q_s : Apport solide moyen interannuel en t /km².an

P : Pluviométrie du mois le plus arrosé en mm

H_{moy} : Altitude moyenne en m

P_a : Pluviométrie moyenne interannuelle en mm

S : Superficie du bassin versant en km²

3.5 Le transport solide

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion, la dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés par le réseau d'écoulement dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de la granulométrie. (Figure 3.1)

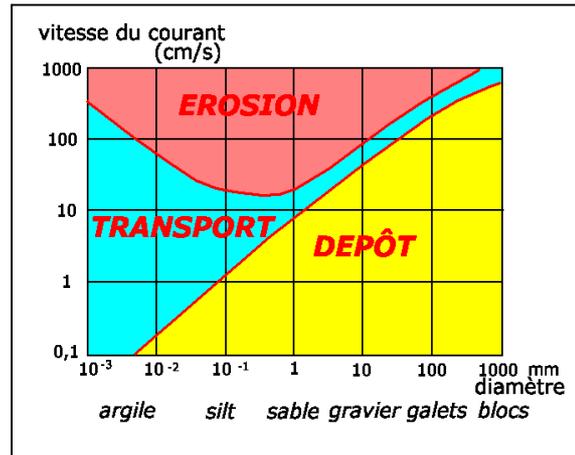


Figure 3.1 Diagramme de Hjulstrom (simplifié)

L'eau trouve la puissance nécessaire pour ce transport dans la perte de charge qu'elle subit. Le champ d'exploitation de vitesse varie tout au long du profil de l'oued d'amont en aval. L'eau met en jeu deux types de mécanismes : Le charriage et la suspension qui sont les principaux types de transport solide.

La capacité de charriage est liée à la nature granulométrique des matériaux et varie dans le temps et dans l'espace avec le débit liquide.

La répartition entre le charriage et la suspension dépend essentiellement de la dimension des matériaux rapportés à la vitesse de l'eau et à la turbulence de l'écoulement. (Figure 3.2)

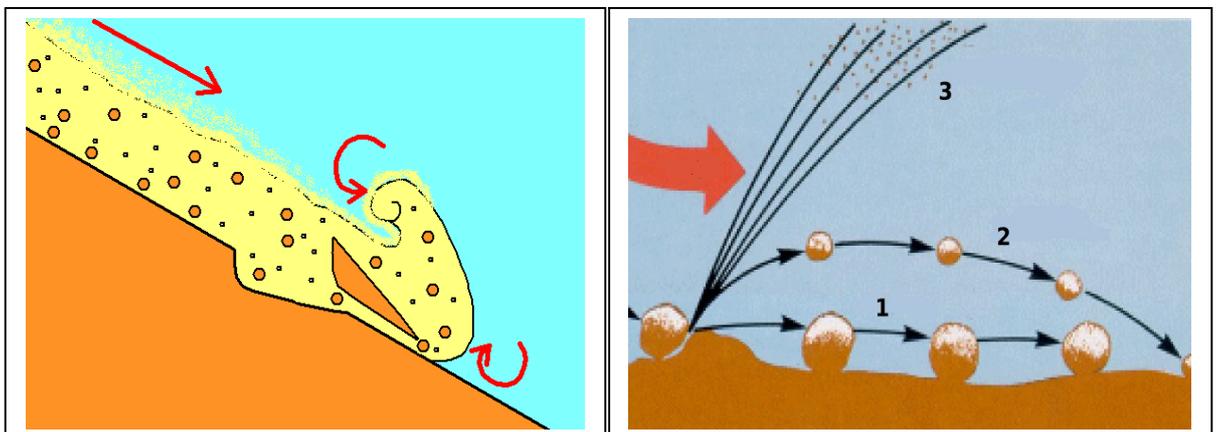


Figure 3.2 Modes de transports : 1-2 Charriage 3- Suspension

3.5.1 Transport par charriage

3.5.1.1 Définition : Le transport par charriage est l'un des principaux types de transport solide dans un cours d'eau, il concerne les plus gros matériaux qui contribuent à la formation et l'équilibre du lit, principalement la pente.

Ces éléments sont transportés par le fond par roulement, glissement, ou saltation. La direction du mouvement est en gros parallèle au fond et les accélérations verticales sont faibles.

Le charriage dit transport de fond, constitue un sérieux problème en régularisation des débits de cours d'eau et dans la construction des ouvrages hydrotechniques.

Plusieurs recherches ont été entamées et axées sur le transport des sédiments en régime fluvial, aussi bien par voie théorique que par voie expérimentale, mais il n'existe pas encore une théorie générale du mécanisme et il est difficile de donner une définition universelle acceptable de la charge de fond.

Du Boys (1879) a été l'un des pionniers de cette recherche sur le charriage. Ce n'est que vers 1930 que cette recherche s'intensifia avec Meyer-Peter, Einstein...

Ils ont basé leurs travaux sur l'équilibre d'une particule au sein d'un liquide en mouvement en régime fluvial, pour un canal de forme régulière.

Mais ces études ne peuvent pas s'appliquer directement à des transports de particules non homogènes pour des formes de lit d'oued non régulières.

Einstein a dressé une liste de caractéristiques qui y sont généralement associées :

1. Il y a échange de particules, permanent et intense entre la charge du fond en mouvement et le lit.
2. La charge du fond se déplace lentement vers l'aval et le mouvement de chaque particule, individuellement se fait à coups rapides séparés par des intervalles de repos relativement longs.
3. Le saut moyen d'une particule est à peu près indépendant des conditions d'écoulement, de l'intensité du transport solide et de la composition des sédiments.
4. Les vitesses de déplacement des différentes particules varient selon qu'elles se déplacent plus ou moins souvent.

3.5.1.2 Description du phénomène

Sur le lit des matériaux sans cohésion, les grains isolés sont soumis aux forces de pesanteur et aux forces hydrauliques. (Figure 3.3)

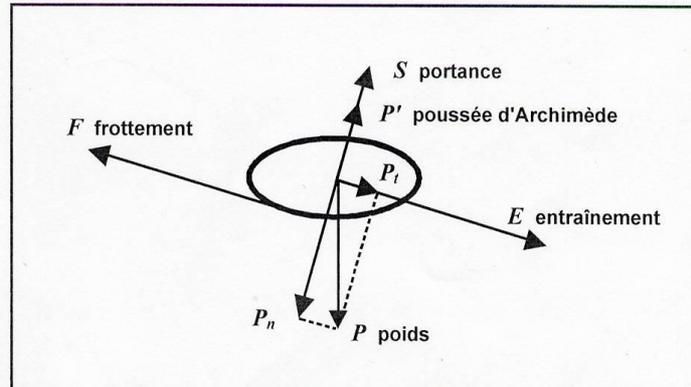


Figure 3.3 Equilibre d'un grain pose sur le fond d'un lit

- Les forces de pesanteur sont des forces stabilisatrices
- Les forces hydrauliques sont des forces déstabilisatrices dues à l'écoulement (Traînée et portance).

La grandeur physique explicative de ce mode de transport (charriage) est la contrainte hydrodynamique critique τ_c .

Donc les grains constituant l'interface solide liquide, ayant un poids et un coefficient de frottement fini, ne peuvent être mis en mouvement par l'action du fluide que si la contrainte sur le fond ' τ_o ' dépasse la valeur de la contrainte critique τ_c .

Ce mouvement de granulats se traduira par un transport de fond dans le sens de l'écoulement.

La contrainte sur le fond de la rivière est exprimée par : $\tau_o = \gamma_w \cdot R_h \cdot I$

I : Perte de charge

R_h : Rayon hydraulique

γ_w : Poids volumique de l'eau

Pour cela, on dit que le charriage est un phénomène à seuil et l'analyse très simplifiée pour le début de mouvement, revient à comparer directement la force de déstabilisation due à l'écoulement à la capacité de résistance au mouvement des matériaux qui tapissent le fond.

Au seuil de mise en mouvement : $E = F - P_t$

$$b \cdot \tau_c \cdot d^2 = a [(\gamma_s \cdot \cos \alpha - \gamma_w) \tan \varphi - \gamma_s \cdot \sin \alpha] d^3$$

$$d'où \quad b \cdot \tau_c \cdot d^2 = a [(\gamma_s - \gamma_w) d^3 \tan \varphi \text{ si } \alpha \text{ petit.}]$$

La force tractrice limite vaut donc : $\tau_c = a \cdot \tan \varphi (\gamma_s - \gamma_w) d / b$

qui peut s'écrire sous forme adimensionnelle : $\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) d} = \frac{a}{b} \tan \varphi$

Le premier terme est classiquement appelé paramètre de Shields et noter τ^* .

Le second terme est indépendant de l'écoulement, il dépend de la forme des grains

a, b : coefficients de forme

Donc le début de mouvement d'un grain de diamètre 'd' se produit quand un paramètre adimensionnel, appelé paramètre de Shields ' τ^* ' dépasse une certaine valeur relativement

constante. Il est noté :

$$\tau^* = \frac{\gamma_w \cdot R_h \cdot I}{(\gamma_s - \gamma_w) d}$$

R_h : Rayon hydraulique

I : Pente de l'écoulement

γ_s : Poids volumique spécifique des grains solides

γ_w : Poids volumique de l'eau

d : Diamètre du grain

Shields a montré expérimentalement en 1936 que pour une granulométrie uniforme, la loi de mise en mouvement des grains pouvait s'exprimer par une simple relation entre ' τ^* ' et le nombre de Reynolds du grain :

$$R^* = u^* \cdot d / \nu \quad \text{où} \quad u^* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho_w}} = \sqrt{g \cdot R_h \cdot I}$$

u^* : Vitesse de frottement près du fond

ν : Viscosité de l'eau

La présentation de Yalin (1972) qui a transformé la relation de Shields en une relation

entre ' τ^* ' et $d^* = d \left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \cdot \frac{g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}}$ utilisée dans le graphe de la figure 3.4

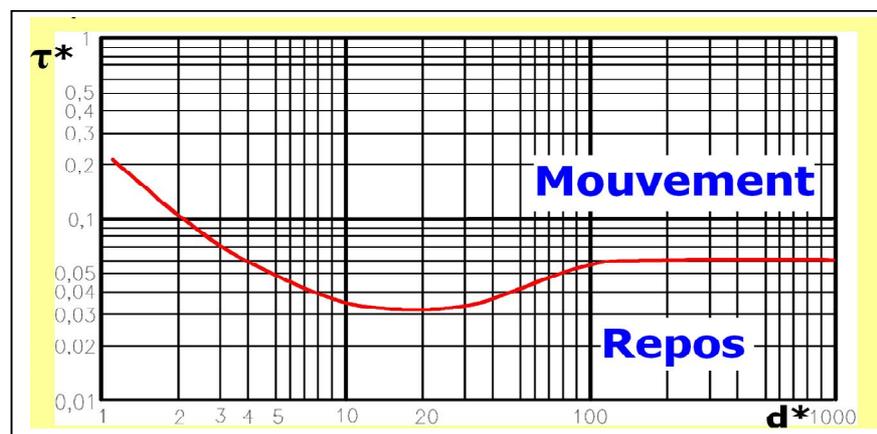


Figure 3.4 Diagramme de Yalin – Shields

3.5.2 Transport en suspension

3.5.2.1 Définition : Le transport par suspension est le deuxième type de transport solide dans un cours d'eau. Il concerne les éléments fins qui progressent dans le sens du courant au sein même du liquide.

Ces éléments fins produits par l'érosion, sont maintenus en suspension par la turbulence qui règne dans le liquide.

3.5.2.2 Description du phénomène

Au fur et à mesure que la vitesse du courant s'accroît dans le cours d'eau, l'intensité de la turbulence s'accroît également jusqu'au stade où les particules en saltation atteignent une hauteur au-dessus du fond où les forces ascensionnelles fluctuantes dues à la turbulence dépassent le poids des particules.

A partir de ce moment, les particules ne suivent plus une trajectoire définie, mais elles suivent des trajectoires aléatoires dans l'épaisseur du fluide.

Le critère d'apparition des phénomènes de suspension, consiste à définir la vitesse 'U' d'écoulement du liquide, par laquelle la poussée de ce dernier sur les grains de diamètre 'D' permet la mise en suspension des grains quartzeux de 0.2 à 0.85 mm de diamètre dans des écoulements naturels de rivière est définie par la formule de W.Kresser :

$$U^2 = 360.g.D$$

Avec $U = C\sqrt{Rh.I}$ et $\tau = \gamma_w .R_h.I$ **d'où** $\tau = 360 \left(\frac{\gamma_w}{C^2}\right)D$

τ : Tension tangentielle de l'écoulement

γ_w : Poids volumique du liquide

C : Coefficient de Chezy

R_h : Rayon hydraulique

I : Perte de charge

Selon Roose (1987), la présence d'éléments solides en suspension dans un cours d'eau est due à la turbulence de l'écoulement. Les particules solides subissent l'action des composantes transversales des vitesses de turbulence ($U = \hat{u} + U'$) qui s'oppose à la pesanteur pour maintenir les particules en suspension.

3.5.3 Quantification du transport solide

De nombreux hydrauliciens ont cherché à établir des relations permettant d'estimer le débit solide d'un cours d'eau, à partir de nombreuses mesures en modèle réduit ou sur des fleuves. Ces différentes formules donnent rarement des résultats comparables, car elles ont été établies dans des conditions différentes. Il n'y a pas de formules universelles de transport solide (Degoutte)[13], il existe un grand nombre de formules mais nous nous contenterons de deux formules les plus utilisées, l'une pour le charriage seul et l'autre pour le transport solide total.

Ces formules évaluent la capacité de transport solide constituée par des sédiments présents au fond du lit ou sur les berges.

3.5.3.1 Formule de transport solide par charriage

1^{re} formule empirique

▪ Rivière à granulométrie uniforme :

La formule empirique de Meyer-Peter et Muller (1948) donne la capacité de transport solide par charriage lorsque les sédiments ont une taille uniforme.

$$q_s = 32 (\beta \cdot \tau^* - 0.047)^{3/2} \cdot d^{3/2}$$

q_s : Débit solide en m^3/s par mètre de largeur de lit exprimé en volume de grains

τ^* : Paramètre de Shields, sans dimension

d : Diamètre des sédiments en m $4 \cdot 10^{-4} m < d < 3 \cdot 10^{-2} m$

γ_s/γ_w : Rapport des poids volumiques du matériau solide sur celui de l'eau

[2.6 à 2.75]

$\beta = \left(\frac{K_f}{K_{grain}} \right)^{3/2}$: Paramètre adimensionnel compris entre 0.35 et 1 et qui dépend de la

rugosité des grains et du fond (pour un fond plat à granulométrie uniforme $\beta = 1$)

$$K_{grain} = \frac{21}{d_{50}^{1/6}}$$

- Rivière à granulométrie étendue

A partir des travaux de Parker, il peut être établi que la formule de Meyer-Peter et Muller reste applicable aux rivières à granulométrie étalée en remplaçant le seuil critique (0.047) par 0.138, le paramètre β valant 1 [13].

$$q_s = 32.L (\tau^* - 0.138)^{3/2} .d^{3/2}$$

d : est le diamètre médian d_{50}

- 2^{ème} formule empirique

La formule empirique d'England et Hansen (1967) donne le transport solide total en volume de grains à saturation par des sédiments non cohésifs (charriage et suspension) cette formule a été établie pour les sables $0.15\text{mm} < d < 5\text{mm}$ ($d=d_{50}$)

$$q_s = 0.020 K^2 .R_h^{1/3} . \tau^{*5/2} .d^{3/2} \quad \tau > 0.25$$

q_s : Débit solide en m^3/s

K : Coefficient de Strickler global du lit incluant la rugosité des berges

$$\gamma_s / \gamma_w = 2.6$$

A partir d'une banque mondiale de 1900 données de laboratoire et 800 données de fleuves, des chercheurs portugais ont établis que la formule d'England et Hansen donnait de bons résultats. 66% des valeurs calculées sont entre la moitié et le double des valeurs mesurées, ce qui est honorable, puisque pour les 10 formules testées, ce ratio varie de 35% à 68%. [13]

3.5.4 Conditions d'utilisation des formules de transport solide

Dans le calcul du transport solide il faut tenir compte des conditions suivantes [13] :

- Toutes les formules de transport solide total ou par charriage doivent être utilisées avec la plus grande prudence car elles sont établis à partir de mesures dans les fleuves ou en laboratoire dans des conditions particulières de topographie, granulométrie, vitesse.
- Il faudra toujours mieux utiliser ces formules en tentant de les recaler, ces tout l'intérêt de leur formulation en variables adimensionnelles.
- Le débit solide $Q_s = L.q_s$ dans une section s'obtient en multipliant q_s par la largeur L du lit. En général il n'est pas tenu compte de la largeur des berges car celles-ci contribuent moins au transport solide.

3.5.5 Formules empiriques pour l'estimation de la dégradation spécifique en Algérie

a) Formule de SOGREAH, (1969)

L'étude de SOGREAH est fondée sur les données de 27 bassins versants algériens dont 17 concernant les cours d'eau alimentant des barrages réservoirs, les superficies des bassins versants varient de 90 à 22300 Km². Les résultats trouvés ont été présentés par une relation de la forme :

$$A = \alpha \cdot R^B$$

A : Dégradation spécifique en t/km².an

R : Ruissellement (mm)

B : 0,15

α est un paramètre empirique variant avec le degré de perméabilité des bassins versants allant de la perméabilité élevée au terrain imperméable

La dégradation peut être estimée par l'une des formulations suivantes :

- $A = 8,5 R^{0,15}$ Perméabilité élevée
- $A = 755 R^{0,15}$ Perméabilité moyenne
- $A = 350 R^{0,15}$ Perméabilité faible à moyenne
- $A = 1400 R^{0,15}$ Perméabilité faible
- $A = 3200 R^{0,15}$ imperméable.

b) Formule de L'A.N.R.H '1970'

$$T_{ss} = 26.62 I_e + 5.071 I_p + 9.77 C_t - 593.59$$

T_{ss} : Transport solide spécifique moyen annuel (t / km².an)

I_e : Indice lithologique en (%)

I_p : Indice des précipitations en (%)

C_t : D_d.F₁ coefficient de torrentialité

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{A}$$

D_d : densité de drainage

L_i : Longueur de tous les cours d'eau d'ordre « 1 » (km)

F_i : Nombre de talweg / surface fréquence des talwegs élémentaires

Cette formule est applicable dans les conditions suivantes :

$$I_e > 10\% \text{ et } I_p > 300$$

c) Formule de M. MEDDI (1998)

En étudiant le transport solide en Algérie du nord, (Etude faite sur 20 barrages Algériens, ainsi que 16 autres marocains, 11 barrages tunisiens et 40 stations hydrométriques Algériennes). L'auteur a développé la relation suivante:

$$D_s = 3286,24 Q_L^{-0,234} S^{-0,197}$$

Ds: Dégradation spécifique (t/Km².an);

Ql: Débit liquide inter annuel (m³/s);

S: Surface du bassin versant (Km²).

3.5.6 Applications numériques

A titre comparatif on fait les applications numériques des deux formules sur le sous bassin de Nahr Ouassel et en voici les résultats :

Tableau 3.1 Calcul empirique de la dégradation spécifique

Formules	Dégradation spécifique en t/Km ² .an
FOURNIER	3921
M.MEDDI	710

3.5.6 Méthodes de mesure du débit solide

3.5.6.1 Charriage

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer le débit solide par charriage. La plus directe d'entre elles est de disposer d'une nasse en grillage métallique sur la largeur du lit de l'oued (transversalement), qui va piéger les sédiments grossiers et laisser passer les matières en suspension.

- Détecteur hydrophonique

Cette méthode consiste à enregistrer et analyser les signaux émis par les matériaux en transport sur le fond du lit.

Le dispositif est composé d'une boîte équipée d'une plaque vibrante sur la face amont qui est orientée normalement au courant grâce à un gouvernail. A l'intérieur de cette boîte se trouve un microphone qui transmet les percussions reçues par la plaque vibrante à l'aide d'un câble.

- Traceur radio-actif

C'est une nouvelle méthode d'étude du charriage dont l'avantage est :

- De toucher une gamme très étendue de matériaux allant des vases aux gros galets.
- D'introduire des traceurs qu'on peut détecter dans le cours d'eau lui même sans prélèvement, ce qui permet la mesure en continu.

Les traceurs rendus émetteurs d'un rayonnement à l'aide d'isotopes radioactifs sont placés sur le fond du lit des cours d'eau et soumis à l'action de déplacement. La répartition dans le temps et dans l'espace de l'intensité du rayonnement émis par les traceurs sert alors de critère pour l'étude du transport solide.

- Procédés topographiques

Par des mesures topographiques, la différence entre deux levés nous donnera la quantité des sédiments déposés au niveau de la retenue. Toutefois par le moyen de cette méthode, on mesure aussi le transport en suspension.

3.5.6.2 Suspension

Elle consiste à effectuer des prélèvements en bordure d'un cours d'eau. Ainsi, dans un laboratoire, nous mesurons la concentration (C) de l'échantillon prélevé par filtration, le passage à l'étuve et enfin la pesée. La relation du débit solide (Q_s) est exprimée par la formule suivante :

$$Q_s = C.Q_l \text{ en kg/s}$$

Une large gamme d'options est aujourd'hui disponible pour mesurer la quantité de sédiments en suspension transportée par un cours d'eau. La méthode la plus rigoureuse pour obtenir une estimation de la charge solide en suspension consiste à procéder comme pour la mesure du débit liquide, à une intégration des différentes concentrations et des vitesses sur plusieurs verticales. Cette technique nécessite un matériel de prélèvement adapté aux caractéristiques de la station de mesure.

Le contrôle en continu de la charge solide est possible grâce aux programmes d'échantillonnages intensifs avec des pompes automatiques ou, de manière indirecte, avec l'installation de turbidimètres.

3.6 Conclusion

En Algérie les valeurs de dégradation spécifique varient d'une région à une autre et d'un bassin à un autre. Nous citons par exemple pour l'oued Mazafran 1160 t/km².an, 2300 t/km².an pour Isser à Lakhdaria, 490 t/km².an pour oued Soumam à Sidi Aich, 680 t/km².an pour oued Madjerda à Souk Ahras et 150 t/km².an pour Macta au barrage Cheurfa.[14]

Ce sont de grandes quantités de sédiments qui sont exportés chaque année vers l'aval et qui affecteront de plein fouet les ouvrages hydrauliques par l'envasement rapide des retenues.

Des études ont été effectuées au niveau de ces ouvrages dont le but de mesurer l'ampleur du transport solide, le constat fut plus qu'alarmant.

En voici quelques échantillons dressés par B.Remini en 2003. [6]

Tableau 3.2 Etat d'envasement de quelques barrages algériens

Barrages	Année de mise en eau	Capacité initiale en Mm ³	Perte annuelle de capacité en Mm ³ /an
OUED FODDA	1932	228	2.66
DJORF TORBA	1934	350	1.3
EGHIL EMDA	1953	154.8	1.6
GHRIB	1939	280	3.2

Le barrage de Boughzoul n'échappe pas à ce constat puisqu'il enregistre une perte de capacité annuelle de 0.49 Mm³ ce qui porte son taux d'envasement au deux tiers de son volume utile depuis 1934 date de sa mise en service. [1]

CHAPITRE 4

PRESENTATION ET ETUDE DES DONNEES DE BASE

4.1 Rappels théoriques

4.1.1 Rappels statistiques

a) Moyenne arithmétique d'un échantillon :

La moyenne arithmétique d'un échantillon est la variable aléatoire x telle que

$$\bar{X} = \sum \frac{X_i}{N}$$

b) La variance

La variance d'une population étant inconnue en pratique, à partir d'un échantillon de taille N et de moyenne \bar{X} , on peut estimer la variance de la population considérée S^2 . En général, la variance d'une série de valeurs est la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre ces valeurs et leur moyenne

$$S^2 = \sum \frac{\left(X_i - \bar{X} \right)^2}{N}$$

c) Ecart type

L'écart type S étant la racine carrée de la variance, il mesure la dispersion des valeurs étudiées autour de la moyenne. L'écart type σ d'une population peut être estimé à partir d'un échantillon par S

$$S = \sqrt{\frac{(X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

d) Coefficient de variation

Il mesure la dispersion relative d'une série. C'est un nombre sans dimension.

$$Cv = \frac{S}{\bar{X}}$$

e) Corrélation simple

La corrélation à deux variables s'emploie généralement entre valeurs annuelles et plus rarement entre variables saisonnières et mensuelles. Bien entendu, le choix des paramètres et la vérification de l'extension d'une corrélation précèdent tout calcul : On opère simplement par report graphique des couples de valeurs à comparer.

Deux cas peuvent se présenter, à l'examen du graphe, selon que la liaison apparaisse : on parle de corrélation linéaire simple entre deux variables Y et X (Débit –Débit ou Débit-Pluie).

Dans le deuxième cas, il s'agit de la corrélation non linéaire qui nécessite une linéarisation

g) Complément statistique des données

L'estimation d'une ou de plusieurs observations d'un échantillon à l'aide d'autres observations prises à des endroits ou à des moments différents, peut se faire en utilisant des méthodes de régression. La seule condition requise est que le lien de dépendance entre les observations des échantillons comparés soit suffisamment étroit et stable.

C'est ainsi que les données manquantes d'une série pourront être complétées grâce à une autre série ayant le coefficient de corrélation le plus grand.

La relation fonctionnelle est dite parfaite si $R = \pm 1$

Il est à signaler que dans ce qui suit les calculs sont faits à l'aide des logiciels, HYFRAN & EXCELL.

4.1.2 Quantification des apports solides

L'apport solide dont il est question dans les formules est celui du transport solide en suspension.

- Débit solide mensuel

La relation de base utilisée est :

$$Q_s = C \cdot Q_l$$

Q_s : Débit solide mensuel en kg

Q_l : Débit liquide mensuel en m³/s

C : Concentration en kg/m³

- Apport solide mensuel

$$A_s = Q_s \cdot T$$

A_s : Apport solide mensuel en kg

Q_s : Débit solide mensuel en kg/s

T : Temps en secondes

- Apport solide annuel

$$A_{s_{an}} = \sum A_{s_i}$$

$A_{s_{an}}$: Apport solide annuel en tonnes

A_{s_i} : Apports solides mensuels en tonnes

4.1.3 Dégradation spécifique moyenne

La Dégradation spécifique moyenne D_s d'un bassin versant est définie comme étant le rapport entre l'apport solide total (charriage compris) [A_{st}] et la surface du bassin versant [S] soit :

$$D_s = \frac{A_{st}}{S}$$

La quantification de l'apport solide moyen interannuel et de la dégradation spécifique moyenne donnent une idée sur l'importance du transport solide et l'état de dégradation du sol du bassin.

4.2 Introduction

Vu la vastitude du territoire du bassin versant amont de Boughzoul et le contraste très marqué de ses aléas climatiques et hydrologiques, il nous paraît judicieux pour une meilleure appréhension du phénomène de subdiviser le bassin en deux grands sous bassins versants à savoir : Le sous bassin oued Touil et le sous bassin Nahr Ouassel. (Figure 4.2)

Une fois affinée, notre approche sera en mesure de fournir une appréciation chiffrée des apports liquides et solides d'une part, et d'autre part circonscrire les zones potentiellement responsables de l'envasement du barrage de Boughzoul afin de mieux orienter la lutte par la suite.

4.3 Traitement des données du barrage de Boughzoul

4.3.1 Apports liquides annuels enregistrés au barrage de Boughzoul

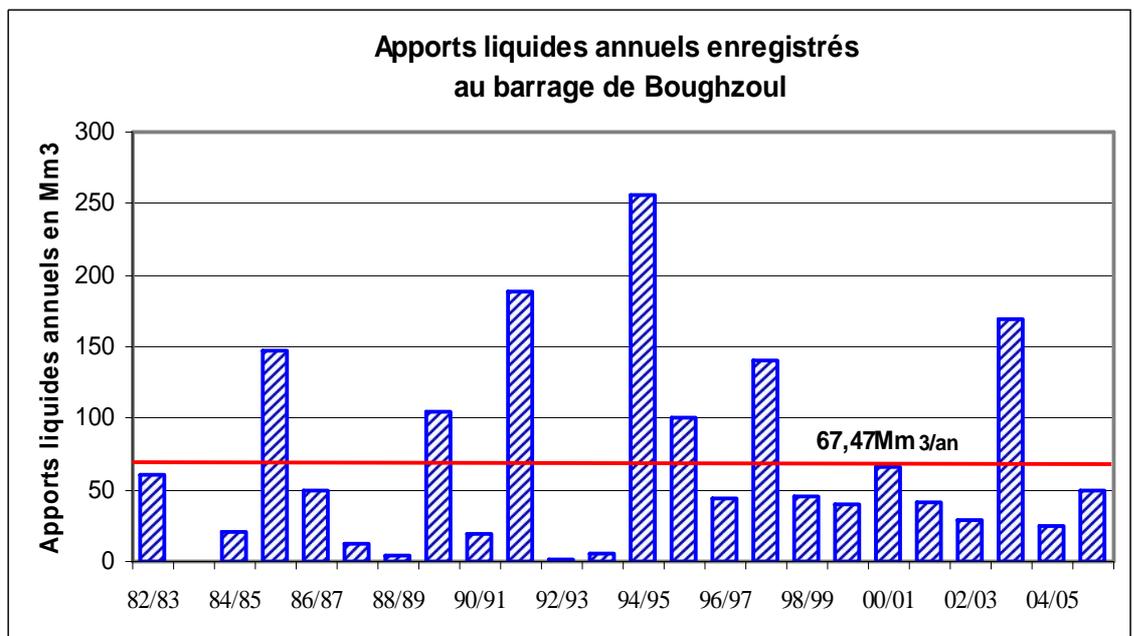


Figure 4.1 Apports liquides annuels enregistrés au barrage de Boughzoul

Tableau 4.1 Caractéristiques statistiques des apports annuels au barrage de Boughzoul

Années	Variable	Taille de l'échantillon	Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation
1982 / 2006	Apport liquide en Mm3	24	67.47	66.13	0.98

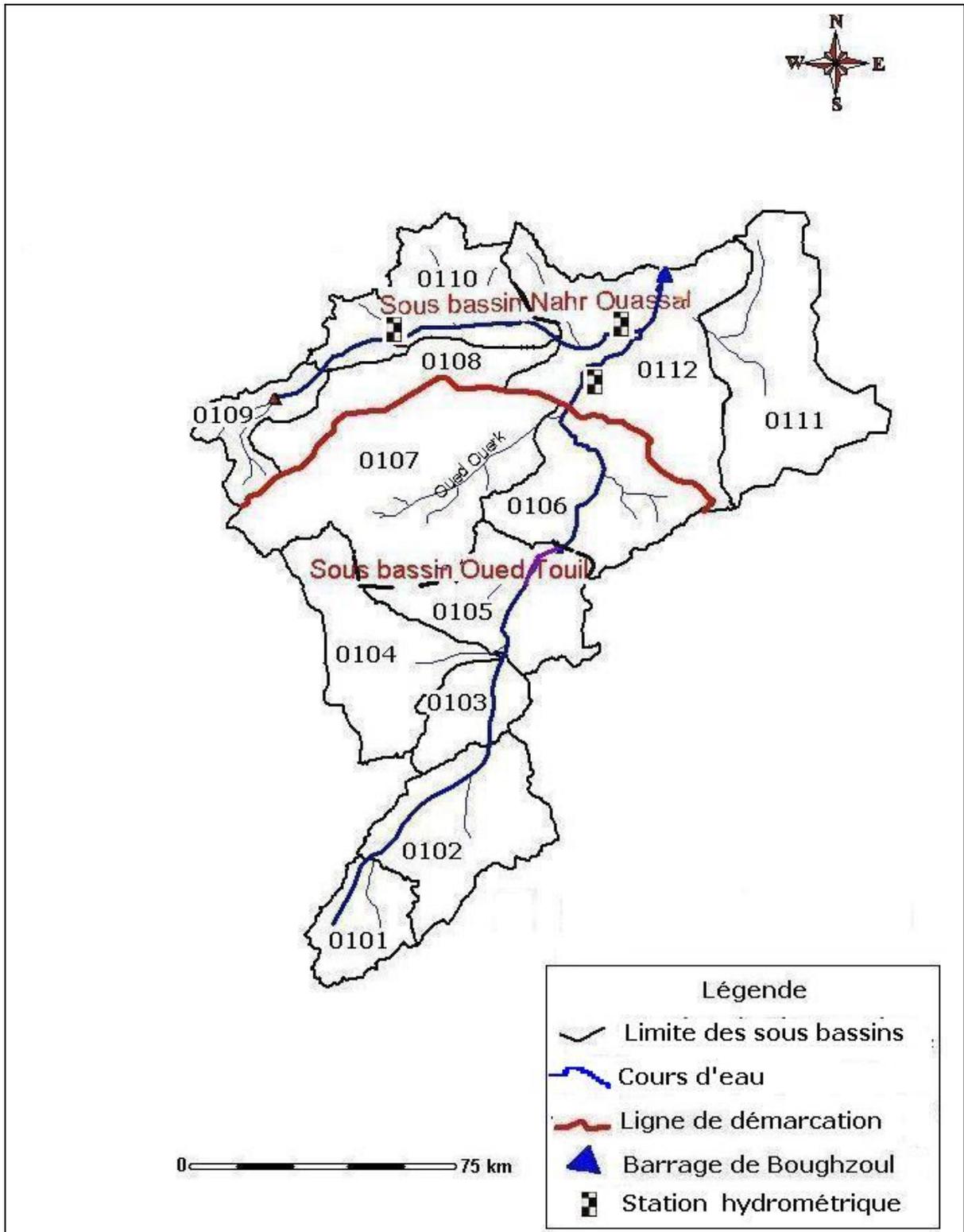


Figure 4.2 Identification des grands sous bassins versants Oued Touil et Nahr Ouassel

4.3.2 Apport solide moyen annuel déduit de la bathymétrie du barrage de Boughzoul

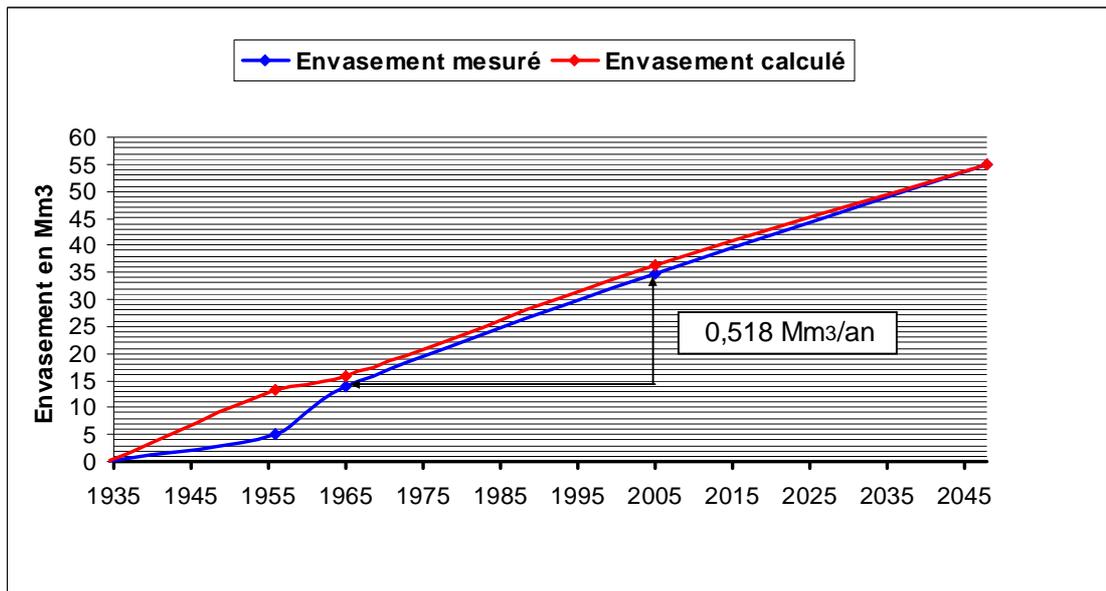


Figure 4.3 Envasement moyen (1965-2005)

Le volume d'envasement moyen correspondant à un apport solide moyen de :

$$A_{ps} = \frac{\Delta V}{N}$$

A partir de la bathymétrie nous avons :

$$\Delta V : \text{Volume d'envasement} \quad \Delta V = 34.73 - 14 = 20.73$$

$$N : \text{Nombre d'années} \quad N = 2005 - 1965 = 40 \text{ ans}$$

$$A_{ps} = \frac{20.73}{40} = 0.518 \text{ Mm}^3/\text{an}$$

Pour une densité de 1.3 [15]

On aura un apport solide moyen annuel de :

$$A_{ps} = 673400 \text{ tonnes}$$

4.4 Traitement des données hydro-pluviométriques du sous bassin oued Touil

4.4.1 Pluviométrie à la Station Sidi Bouabdallah

a) Caractéristiques statistiques de l'échantillon

Tableau 4.2 Caractéristiques statistiques de la série pluviométrique à la station Sidi Bouabdallah (1974/2006)

Station	Variable	Taille de l'échantillon	Moyenne	Intervalle de confiance	Ecart type	Cv
Sidi Bouabdallah	Pluies annuelles en mm	31	173	95%	64.7	0.37

b) Loi d'ajustement

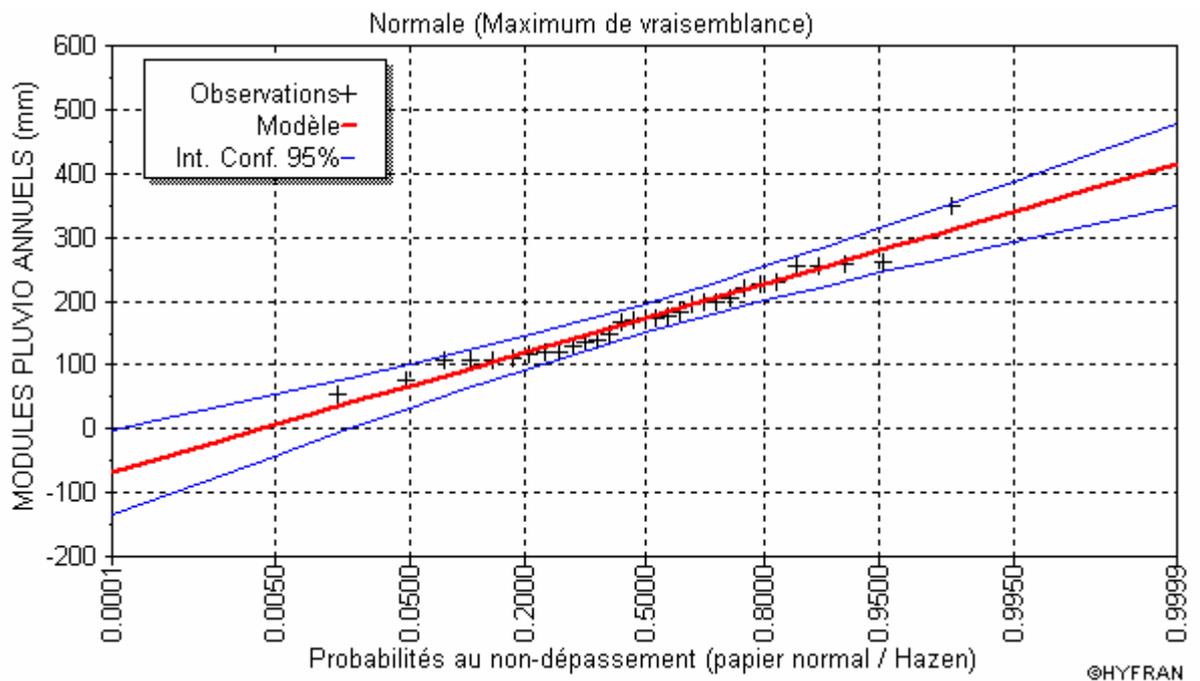


Figure 4.4 Ajustement statistique des modules pluviométriques annuels de la station Sidi Bouabdallah

4.4.2 Données hydro-pluviométriques du sous bassin oued Touil

4.4.2.1. Apports liquides mensuels à la station Sidi Bouabdallah

Tableau 4.3 Apports liquides mensuels de oued Touil en Mm³

Années	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Annuel
83/84	0,17	0,16	0,31	0,48	0,47	1,17	2,13	1,21	1,38	2,07	0,00	3,17	12,71
84/85	0,43	1,05	1,41	2,16	3,12	3,24	3,89	2,99	4,48	1,82	0,96	0,61	26,17
85/86	4,29	1,41	17,88	2,42	1,56	2,00	5,97	0,96	0,61	1,20	0,16	0,04	38,48
86/87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87/88	0,00	2,40	0,10	0,22	0,88	0,97	0,35	0,11	0,60	2,11	0,00	0,01	7,74
88/89	0,18	3,63	0,06	0,38	0,67	0,75	1,09	1,21	2,21	1,02	0,25	0,69	12,14
89/90	35,64	0,67	0,50	0,89	1,35	0,52	0,25	0,48	29,90	1,24	14,90	0,04	86,38
90/91	0,00	0,05	3,10	0,40	0,42	0,69	1,38	1,11	0,43	0,09	0,00	0,00	7,66

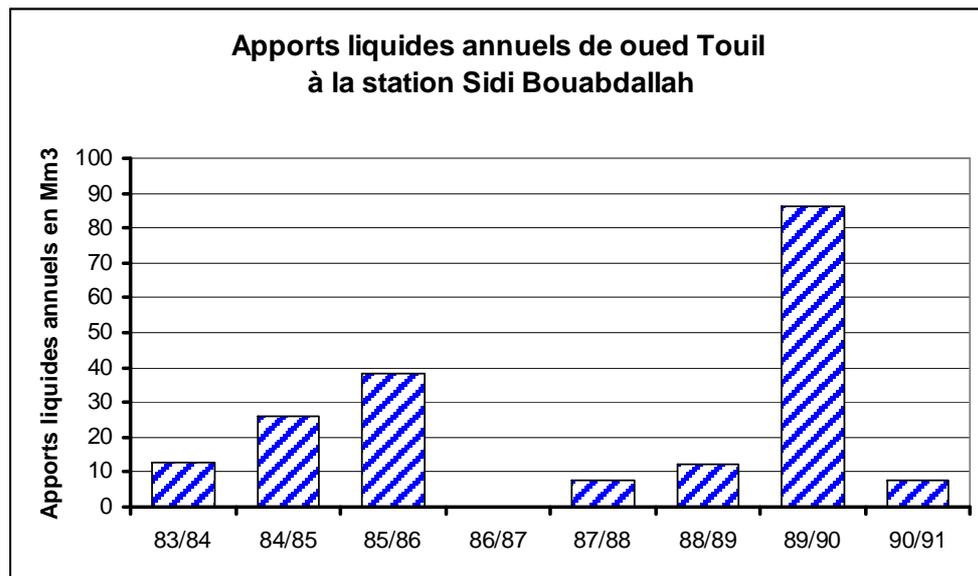


Figure 4.5 Apports liquides annuels de oued Touil à la station Sidi Bouabdallah

4.4.2.2 Comblement de lacunes

Afin de régénérer les mois manquants de l'année 1986/1987, on utilise la droite de régression issue de la corrélation des apports liquides mensuels de oued Touil et les pluies mensuelles à la station Sidi Bouabdallah pour la même chronique.

a) Pluies mensuelles à la station Sidi Bouabdallah

Tableau 4.4 Pluies mensuelles à la station Sidi Bouabdallah en mm

Années	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	annuel
83/84	0,0	2,5	16,1	6,2	18,3	10,4	14,5	15,0	18,9	22,0	0,0	5,2	129,1
84/85	7,5	13,5	25,6	4,3	39,9	6,6	3,9	0,0	30,2	6,8	0,0	0,0	138,3
85/86	21,2	12,4	18,5	7,6	31,6	18,5	17,0	3,0	18,2	25,0	0,0	0,0	173,0
86/87	5,6	20,8	57,5	5,2	19,8	20,5	6,3	1,3	1,6	21,7	23,0	0,0	183,3
87/88	1,9	18,2	19,5	17,7	11,5	6,0	6,4	27,5	15,0	11,5	0,0	0,0	135,2
88/89	3,8	17,6	6,5	7,0	3,6	1,3	6,1	25,9	17,0	8,6	4,0	19,3	120,7
89/90	39,0	1,0	14,7	6,3	35,5	0,0	16,4	17,2	27,4	6,2	0,0	2,8	166,5
90/91	2,0	5,8	26,0	1,7	1,1	9,6	49,9	1,4	6,2	2,6	0,0	0,0	106,3
Moy	10,1	11,5	23,1	7,0	20,2	9,1	15,1	11,4	16,8	13,1	3,4	3,4	144,0

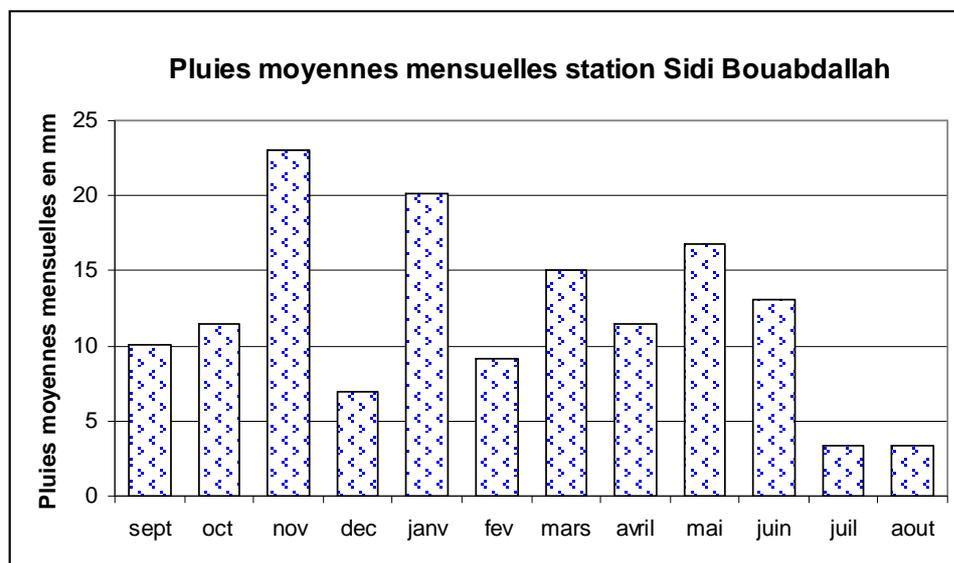


Figure 4.6 Pluies moyennes mensuelles de oued Touil à la station Sidi Bouabdallah

b) Corrélations mensuelles

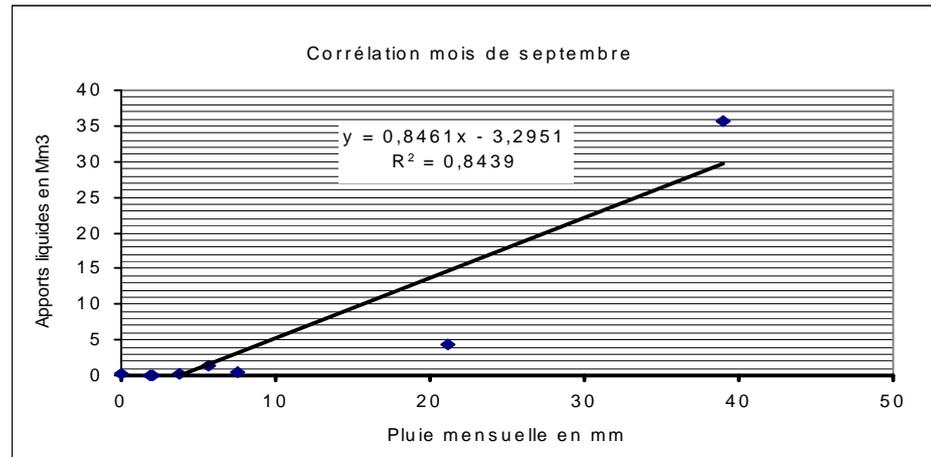


Figure 4.7 Corrélation mois de septembre

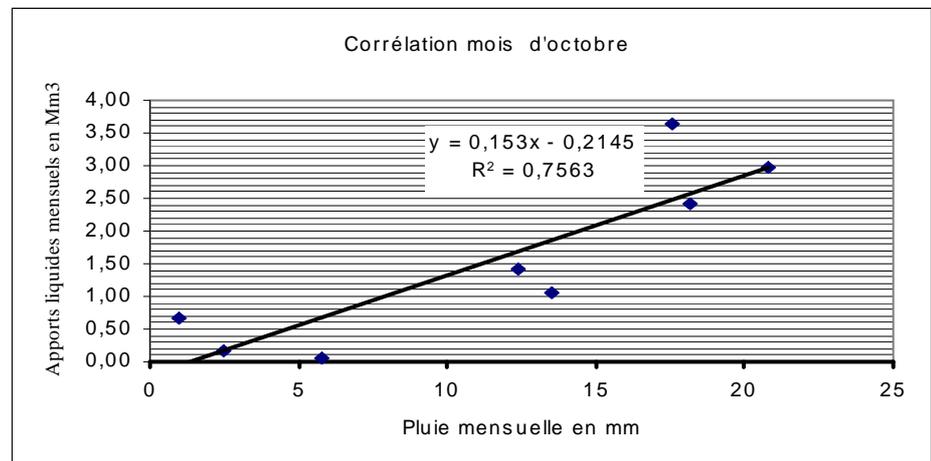


Figure 4.8 Corrélation mois d'octobre

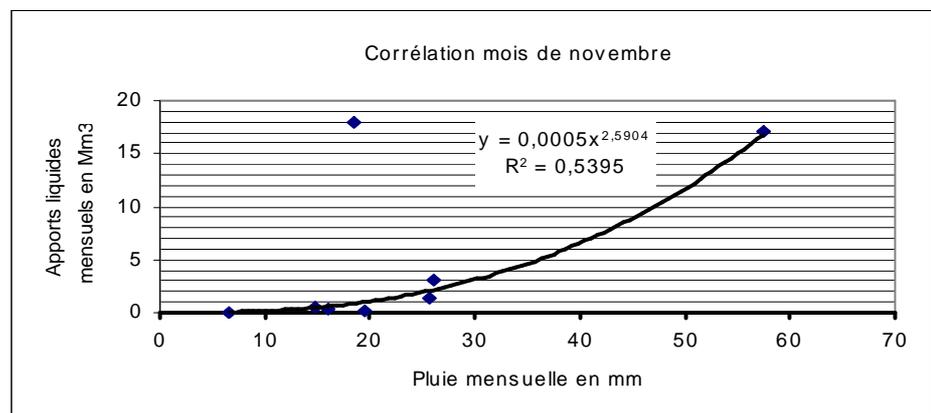


Figure 4.9 Corrélation mois de novembre

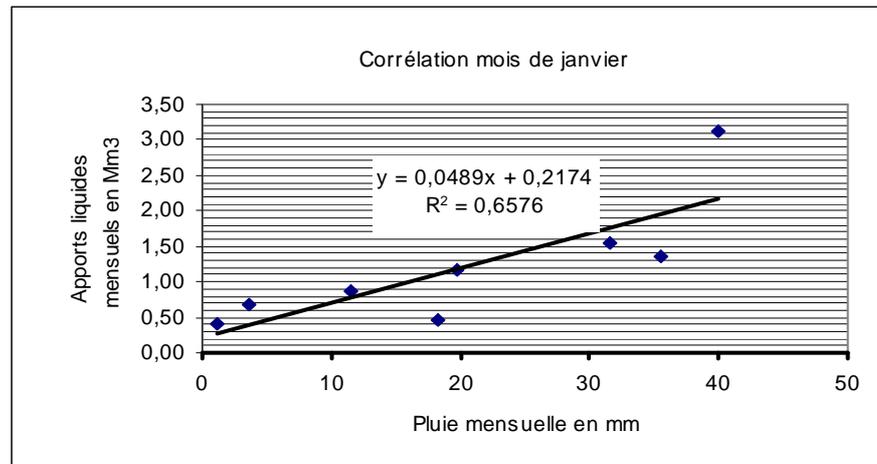


Figure 4.10 Corrélation mois de janvier

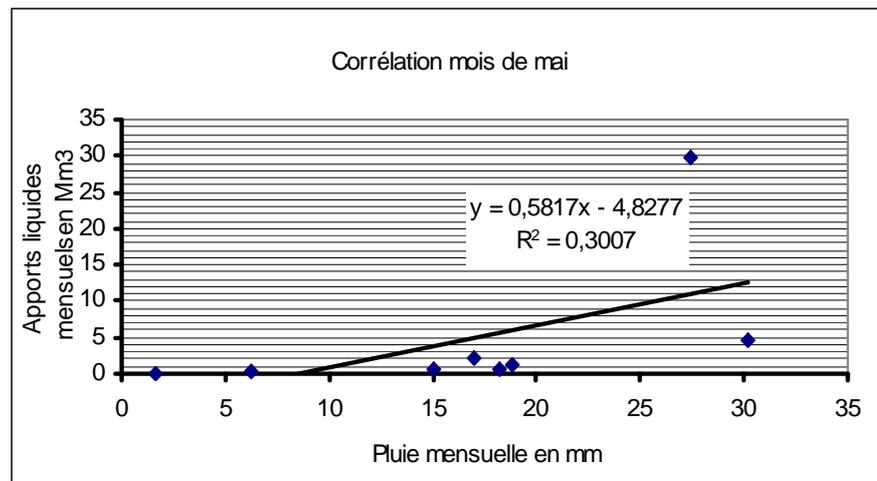


Figure 4.11 Corrélation mois de mai

4.4.2.3 Apports liquides mensuels de oued Touil à la station Sidi Bouabdallah (Après comblement)

Tableau 4.5 Apports liquides mensuels de oued Touil en Mm³
Station Sidi Bouabdallah 011210

Années	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Total
83/84	0,17	0,16	0,31	0,48	0,47	1,17	2,13	1,21	1,38	2,07	0,00	3,17	12,71
84/85	0,43	1,05	1,41	2,16	3,12	3,24	3,89	2,99	4,48	1,82	0,96	0,61	26,17
85/86	4,29	1,41	17,88	2,42	1,56	2,00	5,97	0,96	0,61	1,20	0,16	0,04	38,48
86/87	1,58	2,97	16,64	0,80	1,00	2,27	1,88	0,00	0,00	1,58	0,00	0,00	28,72
87/88	0,00	2,40	0,10	0,22	0,88	0,97	0,35	0,11	0,60	2,11	0,00	0,01	7,74
88/89	0,18	3,63	0,06	0,38	0,67	0,75	1,09	1,21	2,21	1,02	0,25	0,69	12,14
89/90	35,64	0,67	0,50	0,89	1,35	0,52	0,25	0,48	29,90	1,24	14,90	0,04	86,38
90/91	0,00	0,05	3,10	0,40	0,42	0,69	1,38	1,11	0,43	0,09	0,00	0,00	7,66
Moy	5,29	1,54	5,00	0,97	1,18	1,45	2,12	1,01	4,95	1,39	2,03	0,57	27,50

4.4.2.4 Concentrations moyennes à la station Sidi Bouabdallah

Tableau 4.6 Concentrations moyennes en g/l
Station Sidi Bouabdallah 011210

Années	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
89 / 90	3,28	27,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,56	0,60	0,00	0,00
90 / 91	0,00	0,00	2,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
91 / 92	0,00	25,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
03 / 04	2,84	19,16	5,52	3,62			4,92	14,05	11,58	20,11		
04 / 05	12,70						1,23	3,51	3,79	5,18		
05 / 06	37,79	4,62										
Moy	9,43	15,32	1,98	0,9	0	0	1,23	3,51	3,79	5,18	0	0

4.4.2.5 Apports solides mensuels de oued Touil à la station de Sidi Bouabdallah

Tableau 4.7 Apports solides mensuels de oued Touil en tonnes
Station Sidi Bouabdallah 011210

Années	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Total
83/84	1584,24	2389,92	617,76	427,5	0	0	2617,44	4247,1	5215,04	10727,8	0	0	27826,8
84/85	4064,33	16086	2795,76	1943,1	0	0	4785,93	10501,9	16983	9437,96	0	0	66598
85/86	40417	21555,2	35394,5	2173,5	0	0	7343,1	3355,56	2300,53	6236,72	0	0	118776
86/87	14899,4	45500,4	32947,2	720	0	0	2312,4	0	0	8184,4	0	0	104564
87/88	0	36829,3	196,02	199,8	0	0	429,27	368,55	2266,42	10919,4	0	0	51208,8
88/89	1725,69	55550,3	116,82	340,2	0	0	1344,39	4250,61	8379,69	5283,6	0	0	76991,3
89/90	336123	10325,7	988,02	802,8	0	0	306,27	1677,78	113321	6397,3	0	0	469942
90/91	18,86	704,72	6145,92	358,2	0	0	1691,25	3885,57	1629,7	461,02	0	0	14895,2
Moy	49854,1	23617,7	9900,25	870,638	0	0	2603,76	3535,89	18761,9	7206,03	0	0	116350

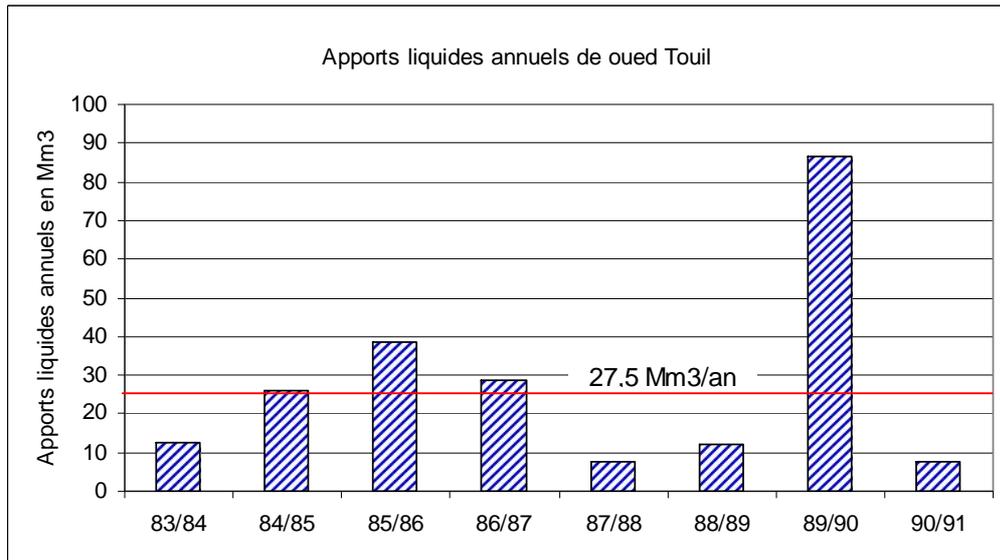


Figure 4.12 Apports liquides annuels de oued Touil (série comblée)

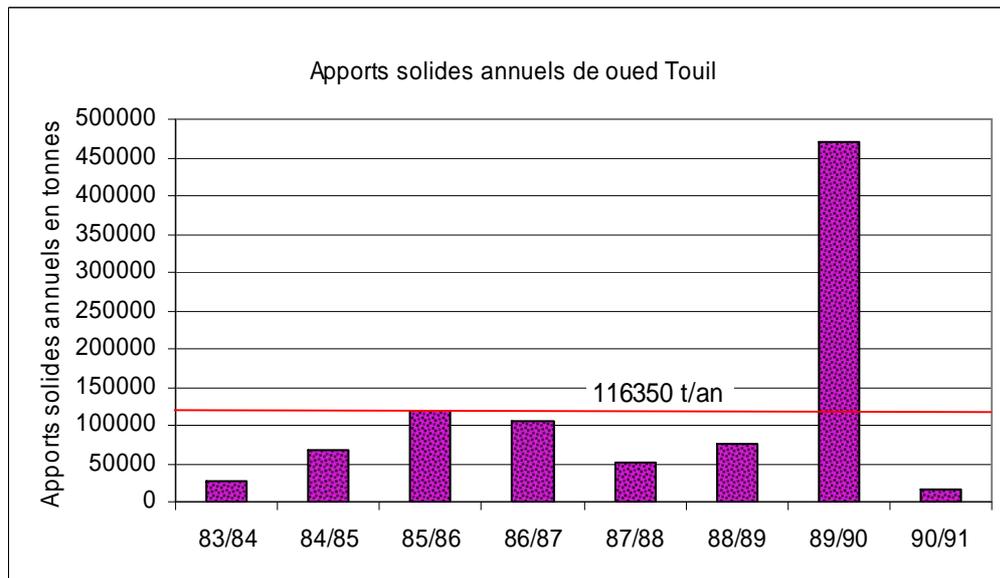


Figure 4.13 Apports solides annuels de oued Touil

4.5 Traitement des données hydro-pluviométriques du sous bassin Nahr Ouassel

4.5.1 Données pluviométriques à la station Colonel Bougara

a) Caractéristiques statistiques de l'échantillon

Tableau 4.8 Caractéristiques statistiques de la série pluviométrique à la station colonel Bougara (1972/2002)

Station	Variable	Taille de l'échantillon	Moyenne	Intervalle de confiance	Ecart type	C_v
Colonel Bougara	modules annuels en mm	20	354	95%	83	0.23

b) Loi d'ajustement

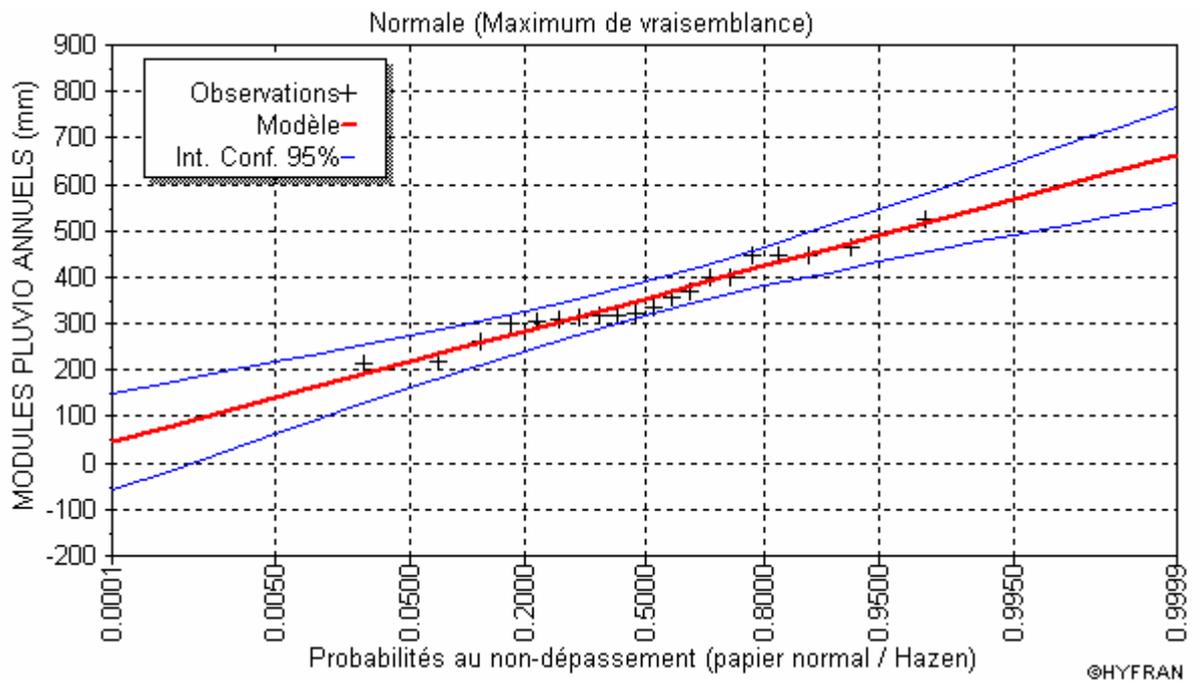


Figure 4.14 Ajustement statistique des modules pluviométriques annuels de la station colonel Bougara

4.5.2 Déduction des apports liquides mensuels de Nahr Ouassel à partir du barrage de Boughzoul

En raison de l'absence de barèmes, on ne peut exploiter les données fournies par la station Kef Lesfar (011202) près de la confluence avec oued Touil mais connaissant les apports liquides mensuels totaux au droit du barrage de Boughzoul, on peut déduire l'apports mensuels du sous bassin Nahr Ouassel par soustraction de ceux de Oued Touil.

Par ailleurs les concentrations fournies par la station en question nous seront d'une grande utilité dans l'estimation des apports solides.

4.5.2.1 Apports liquides mensuels enregistrés au barrage de Boughzoul (83/91)

Tableau 4,9 Apports liquides mensuels enregistrés au barrage Boughzoul en Mm³

Années	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	MAR.	Avr.	Mai.	Juin	Juil.	Août	Annuel
1983/1984	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1984/1985	0,000	1,125	3,714	4,839	3,850	4,238	2,639	0,494	0,000	0,107	0,095	0,004	21,105
1985/1986	1,555	4,925	16,700	0,851	0,876	31,459	81,478	3,033	1,807	2,874	0,674	0,701	146,933
1986/1987	0,639	6,490	15,851	1,083	1,382	14,563	2,022	1,399	1,442	0,997	3,066	0,575	49,509
1987/1988	1,824	3,291	0,618	0,686	0,709	0,527	0,718	0,747	0,930	2,024	0,618	0,026	12,718
1988/1989	0,000	0,831	0,068	2,052	0,131	0,231	0,295	0,225	0,059	0,048	0,000	0,000	3,940
1989/1990	47,151	1,701	1,085	2,042	3,736	1,083	2,316	1,889	22,201	2,477	18,610	0,000	104,291
1990/1991	1,410	0,624	0,686	1,172	0,499	0,478	6,114	4,376	1,176	1,213	1,036	0,335	19,119
Moyenne	6,572	2,373	4,840	1,591	1,398	6,572	11,948	1,520	3,452	1,218	3,012	0,205	44,702

4.5.2.2 Apports liquides mensuels détaillés de Nahr Ouassel

Tableau 4,10 Apports liquides mensuels détaillés de Nahr Ouassel en Mm³

Années	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	MAR.	Avr.	Mai.	Juin	Juil.	Août	Rétention	Apports
83/84	-0,168	-0,156	-0,312	-0,475	-0,473	-1,173	-2,128	-1,21	-1,376	-2,071	0	-3,168	-12,71	0
84/85	-0,431	0,075	2,302	2,68	0,734	0,995	-1,252	-2,498	-4,481	-1,715	-0,865	-0,608	-11,85	6,786
85/86	-2,731	3,518	-1,176	-1,564	-0,681	29,459	75,508	2,077	1,2	1,67	0,518	0,659	-6,152	114,609
86/87	-0,941	3,52	-0,789	0,283	0,382	12,293	0,142	1,399	1,442	-0,583	3,066	0,575	-2,313	23,102
87/88	1,824	0,887	0,519	0,464	-0,166	-0,443	0,369	0,642	0,332	-0,084	0,618	0,013	-0,693	5,668
88/89	-0,183	-2,795	0,009	1,674	-0,542	-0,519	-0,798	-0,986	-2,152	-0,972	-0,246	-0,686	-9,879	1,683
89/90	11,507	1,027	0,586	1,15	2,391	0,559	2,067	1,411	-7,699	1,242	3,71	-0,04	-7,739	25,65
90/91	1,408	0,578	-2,418	0,774	0,079	-0,215	4,739	3,269	0,746	1,124	1,036	0,335	-2,633	14,088
Moy	1,29	0,83	-0,16	0,62	0,22	5,12	9,83	0,51	-1,50	-0,17	0,98	-0,37	-6,75	23,95

Remarque : Les valeurs négatives expriment le déficit au barrage provoqué par la rétention des apports de oued Touil par le sous bassin Nahr Ouassel

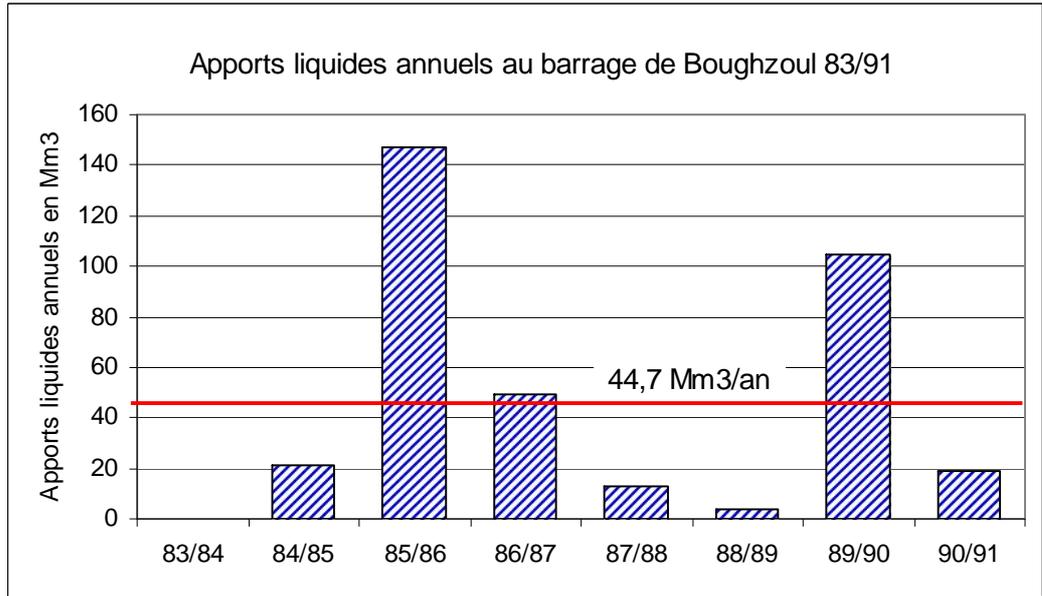


Figure 4.15 Apports liquides annuels enregistrés au barrage de Boughzoul (83/91)

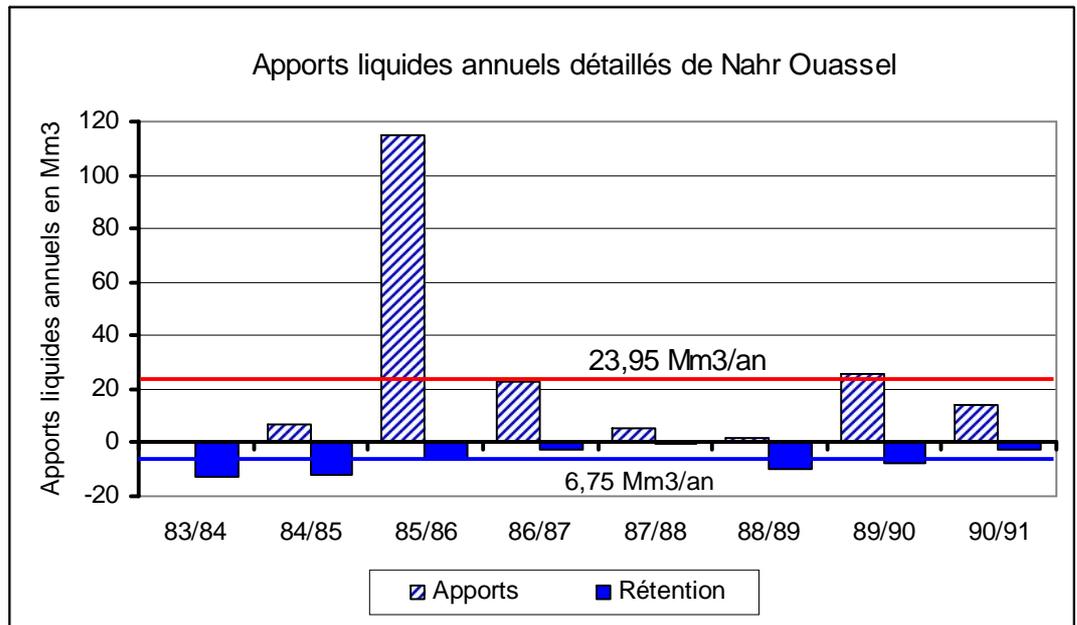


Figure 4,16 Apports liquides annuels détaillés de Nahr Ouassel

4.5.2.3 Concentrations moyennes du sous bassin Nahr Ouassel

Il est difficile d'avoir des concentrations mensuelles moyennes représentatives de tout le sous bassin versant Nahr Ouassel mais faute de mieux on va tenter de les estimer en prenant la moyenne des deux principales stations du sous bassin à savoir:

- Station colonel Bougara dont les valeurs sont prélevées à partir de l'étude hydrologique du barrage de colonel Bougara établie par SOGREAH .[16]
- Station Kef lesfar dont les observations sont fournies par le fichier 011202ts de l'A.N.R.H

Tableau 4.11 Concentrations moyennes en g/l

Stations	Années	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
C.Bougara	74/75							3,00					
	76/77					3,00							
	77/78					5,00							
	78/79	23,25											
	81/82				2,00						2,85		
Kef Lesfar	83/84	1,34		12,22				14					20,41
	84/85		50,35	15,7		6,63	36,56	7,78					
	85/86	39,69		24,98		5,62	7,2	2,95					
	86/87		67,55	41,71		3,87	9,01					9,16	
	87/88	140,23		4,82									
	88/89		48,09				12,46	17,63		14,5			76,44
Concent Moyenne		51,13	55,33	19,89	2,00	4,82	16,31	9,07	0,00	14,50	2,85	9,16	48,425

4.5.2.3 Apports solides mensuels nets de Nahr Ouassel au barrage de Boughzoul

Tableau 4.12 Apports solides mensuels nets de Nahr ouassel en tonnes

Années	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	MAR.	Avr.	Mai.	Juin	Juil.	Août	Total
83/84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
84/85	0	4150	45787	5360	3541	16228	0	0	0	0	0	0	75066
85/86	0	194651	0	0	0	480476	685009	0	17400	4760	4745	31915	1418956
86/87	0	194762	0	566	1843	200499	1288	0	20909	0	28085	27847	475798
87/88	93261	49078	10323	928	0	0	3348	0	4814	0	5661	630	168042
88/89	0	0	179	3348	0	0	0	0	0	0	0	0	3527
89/90	588353	56824	11656	2300	11534	9117	18752	0	0	3540	33984	0	736059
90/91	71991	31981	0	1548	381	0	42992	0	10817	3203	9490	16224	188627
Moy	94201	66431	8493	1756	2162	88290	93924	0	6743	1438	10245	9577	383259

4.5.3 Apports liquides mensuels nets de oued Touil au barrage de Boughzoul

En raison de la rétention exercée par le sous bassin de Nahr Ouassel empêchant une partie des apports liquides de oued Touil d'arriver à la retenue de Boughzoul il y a lieu de les déduire à partir des apports brut enregistrés à la station Sidi bouabdallah.

4.5.3.1 Evaluation des pertes en apports liquides de oued Touil par rétention du sous bassin de Nahr Ouassel

Tableau 4.13 Pertes en apports liquides mensuels de oued Touil en Mm³

Années	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	MAR.	Avr.	Mai.	Juin	Juil.	Août	Total
83/84	0,17	0,16	0,31	0,48	0,47	1,17	2,13	1,21	1,38	2,07	0,00	3,17	12,71
84/85	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,25	2,50	4,48	1,72	0,87	0,61	11,85
85/86	2,73	0,00	1,18	1,56	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,15
86/87	0,94	0,00	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00	2,31
87/88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,44	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,69
88/89	0,18	2,80	0,00	0,00	0,54	0,52	0,80	0,99	2,15	0,97	0,25	0,69	9,88
89/90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,70	0,00	0,00	0,04	7,74
90/91	0,00	0,00	2,42	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,63
Moy	0,56	0,37	0,59	0,25	0,23	0,29	0,52	0,59	1,96	0,68	0,14	0,56	6,75

4.5.3.2 Apports liquides mensuels nets de oued Touil au droit du barrage de Boughzoul

Tableau 4.14 Apports liquides mensuels nets de oued Touil au barrage de Boughzoul en Mm³

Annees	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Total
83/84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
84/85	0	1,05	1,412	2,159	3,116	3,243	2,639	0,494	0	0,107	0,095	0,004	14,319
85/86	1,555	1,407	16,7	0,851	0,876	2	5,97	0,956	0,607	1,204	0,156	0,042	32,324
86/87	0,639	2,97	15,851	0,8	1	2,27	1,88	0	0	0,997	0	0	26,407
87/88	0	2,404	0,099	0,222	0,709	0,527	0,349	0,105	0,598	2,024	0	0,013	7,05
88/89	0	0,831	0,059	0,378	0,131	0,231	0,295	0,225	0,059	0,048	0	0	2,257
89/90	35,644	0,674	0,499	0,892	1,345	0,524	0,249	0,478	22,201	1,235	14,9	0	78,641
90/91	0,002	0,046	0,686	0,398	0,42	0,478	1,375	1,107	0,43	0,089	0	0	5,031
Moy	4,730	1,173	4,413	0,713	0,950	1,159	1,595	0,421	2,987	0,713	1,894	0,007	20,754

4.5.3.3 Apports solides mensuels nets de oued Touil au barrage de Boughzoul

Tableau 4.15 Apports solides mensuels nets de oued Touil au barrage de Boughzoul en Mm³

Années	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Total
83/84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
84/85	0	16086	2795,76	1943,1	0	0	3245,97	1733,94	0	554,26	0	0	26359,03
85/86	14663,65	21555,24	33066	765,9	0	0	7343,1	3355,56	2300,53	6236,72	0	0	89286,7
86/87	6025,77	45500,4	31384,98	720	0	0	2312,4	0	0	5164,46	0	0	91108,01
87/88	0	36829,28	196,02	199,8	0	0	429,27	368,55	2266,42	10484,32	0	0	50773,66
88/89	0	12730,92	116,82	340,2	0	0	362,85	789,75	223,61	248,64	0	0	14812,79
89/90	336122,9	10325,68	988,02	802,8	0	0	306,27	1677,78	84141,79	6397,3	0	0	440762,6
90/91	18,86	704,72	1358,28	358,2	0	0	1691,25	3885,57	1629,7	461,02	0	0	10107,6
Moy	44603,9	17966,53	8738,235	641,25	0	0	1961,389	1476,394	11320,26	3693,34	0	0	90401,29

Remarque : La rétention exercée par Nahr Ouassel touche également les apports en sédiments qui sont associés aux apports liquides, mais comme on n'a pas la certitude que ces derniers soient remis en suspension a posteriori et regagner la retenue du barrage, on préfère ne pas en tenir compte.

4.5.4 Représentation graphique des apports liquides annuels nets des sous bassins au barrage
 a) Apports liquides annuels nets

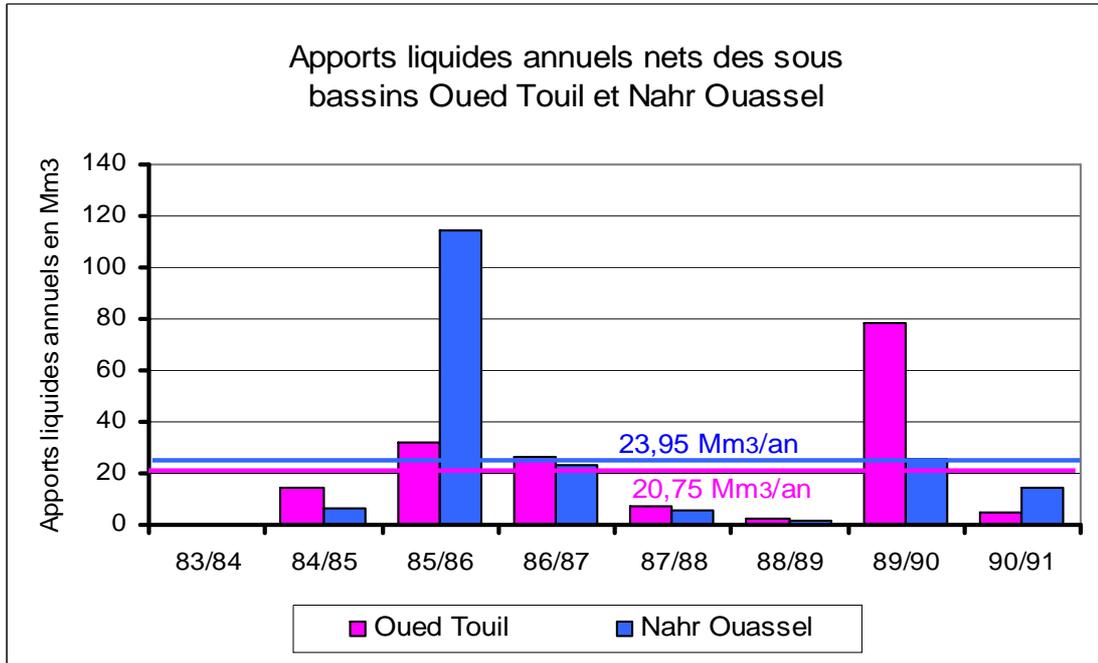


Figure 4.17 Apports liquides annuels nets des sous bassins Oued Touil et Nahr Ouassel

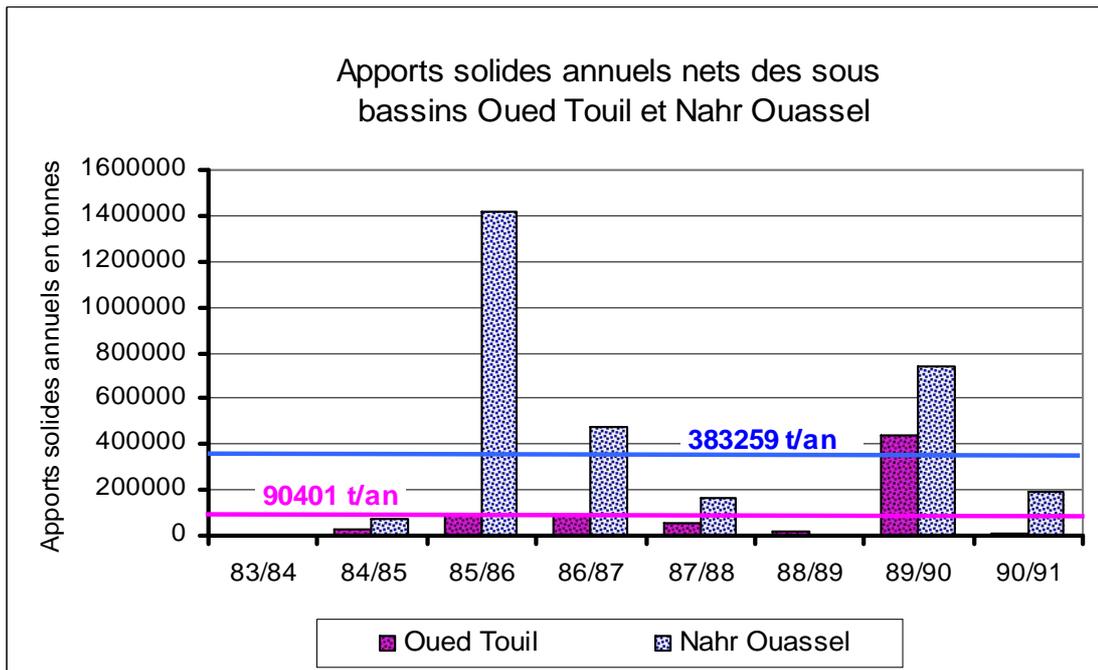


Figure 4.18 Apports solides annuels nets des sous bassins Oued Touil et Nahr Ouassel

4.5.5 Corrélations des apports annuels nets des sous bassins au barrage de Boughzoul

Tableau 4.16 Apports annuels nets des sous bassins

Années	Oued Touil		Nahr Ouassel	
	Liquides en Mm ³	Solides en tonnes	Liquides en Mm ³	Solides en tonnes
83/84	0,00	0,00	0,00	0,00
84/85	14,32	26359,03	6,79	75065,80
85/86	32,32	89286,70	114,61	1418955,56
86/87	26,41	91108,01	23,10	475798,23
87/88	7,05	50773,66	5,67	168041,78
88/89	2,26	14812,79	1,68	3527,01
89/90	78,64	440762,56	25,65	736058,96
90/91	5,03	10107,60	14,09	188627,29
Moy	20,75	90401,29	23,95	383259,33

a) Apports annuels nets de oued Touil

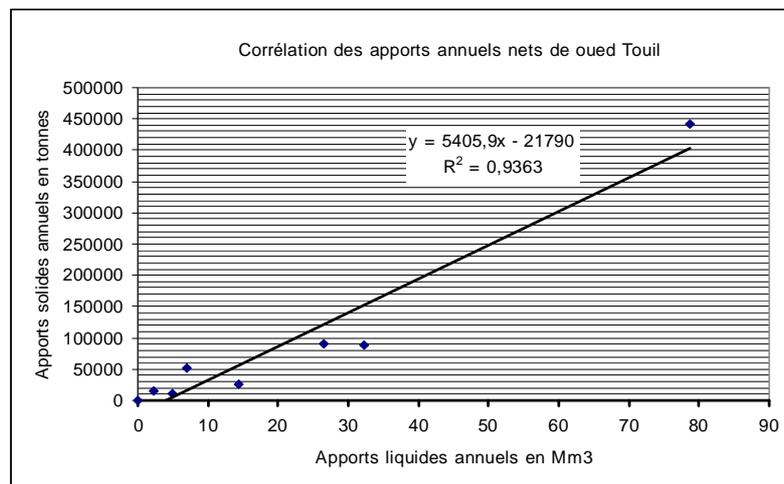


Figure 4.19 Corrélation des apports annuels de oued Touil au barrage

b) Apports annuels nets Nahr Ouassel

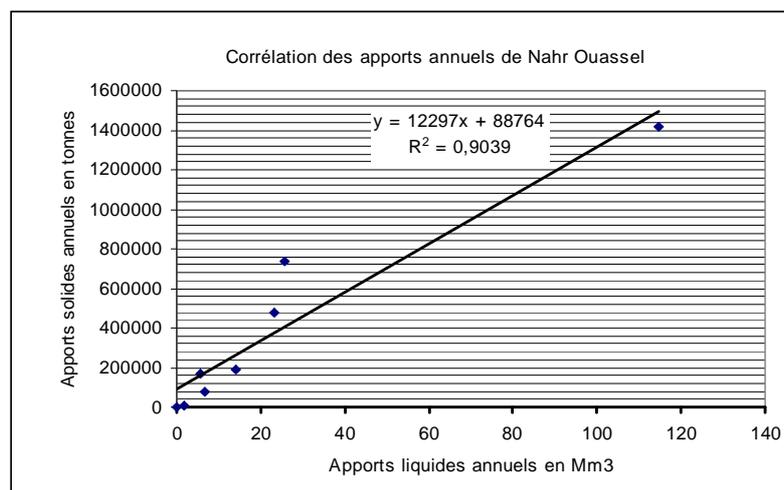


Figure 4.20 Corrélation des apports annuels de Nahr Ouassel au barrage

4.6 Résultats

Pour la quantification de l'apport solide total au barrage de Boughzoul et évaluer le taux de dégradation spécifique inhérent à tout le bassin versant du Chellif amont de Boughzoul [19645km²] on doit tenir compte du taux de charriage qui est estimé à 20% de la matière en suspension d'après l'étude de prospection hydrologique de oued Touil par la mission soviétique [4].

Tableau 4.17 Résultats

Sous bassins	Apports nets des sous bassins au barrage mesurés par hydrométrie 1983/1991			Apports enregistrés au barrage 1983/1991		Dégradation spécifique en t/km ² .an	
	Liquides en Mm3	Solides en tonnes		Limnimétrie	Bathymétrie	Hydrométrie	Bathymétrie
		Suspension	Charriage	Liquides en Mm3	Solides en tonnes		
Oued Touil	20.75	90401.3	18080	44.7	673400	28.9	34.27
Nahr Ouassel	23.94	383259	76652				
Total	44.7	568392.7		44.7	673400		

4.7 Discussion

Les résultats précédents illustrent bien l'activité hydrologique du bassin versant Chellif amont de Boughzoul notamment en matière de transport solide où le sous bassin de Nahr Ouassel contribue à hauteur de 80 % dans l'envasement du barrage de Boughzoul contre une infime partie du vaste bassin de oued Touil.

Dans ce même contexte et à titre indicatif les conclusions de l'étude de la mission soviétique en 1968/1970 dans son rapport de prospection hydrologique du bassin de oued Touil au niveau du poste de Sidi Bouabdallah annexe A [4], méritent d'être citées:

Tableau 4.17 Apports liquides et solides annuels de oued Touil à la station Sidi Bouabdallah (Mission soviétique)

Année	Apports annuels		Pluie annuelle en mm K. Chellala
	Liquide en Mm ³	Solide total (suspension et charriage) en tonnes	
1969 – 1970	93.51	104109.45	398

Ceci conforte bien nos conclusions compte à la faiblesse de l'apport solide de oued Touil vis-à-vis de Nahr Ouassel, malgré l'abondance de la pluviométrie de l'année (69/70).

Par ailleurs le passage de C. Caratini dans son étude géologique de la région [5], nous fait part d'une importante constatation qui peut expliquer la faiblesse des corrélations hydro-pluviométriques envisagées en raison du caractère endoréique qui caractérise le bassin : « lors des crues de l'oued Touil, au niveau de Taguine, le lit majeur est entièrement rempli alors que 60km en aval à Belkreitar, le débit n'est guère abondant bien que le lit de l'oued se resserre. On a l'impression que l'eau a disparu entre temps».

En plus de la bathymétrie qui rend compte du transport solide réel en amont du barrage de colonel Bougara (130000 t/an)[9], les apports liquides régularisés annuellement à ce niveau (16 Mm³ soit 67% des apports liquides de Nahr Ouassel au barrage de Boughzoul), peuvent également attirer notre attention sur l'asymétrie de l'activité hydrologique de part et d'autre de la station Kef Lesfar minimisant ainsi nos erreurs compte à la représentativité des apports liquides et solides de Nahr Ouassel.

4.8 Identification de la zone mobilisatrice de sédiments

Parmi les indices qui étayent notre thèse compte à l'implication prépondérante du sous bassin élémentaire 0110 dans la production de la majeure partie des apports solides, responsables de l'envasement du barrage de Boughzoul on peut citer après examen des données cartographiques et morphométriques :

- la pluviométrie abondante et la plus élevée (350 à 600mm) dont jouit le sous bassin 0110 (Figure 1.7)
- Chevelu hydrographique très développé au nord (Figure 1.10) ou la densité de drainage est $Dd = 0.71$.
- Relief très prononcé dont la dénivelée spécifique (Tableau 1.3) est de $Ds = 1425 > 500$, classé très fort par l'O.R.S.T.O.M
- Sols marneux, moins protégé très vulnérables à l'érosion
- Le facteur anthropique qui reste trop actif dans la propagation de l'élan mais très passif dans la lutte

4.9 Conclusion

Les conclusions chiffrées et argumentées de notre étude ont confirmé sans la moindre équivoque l'implication du sous bassin Nahr Ouassel dans l'envasement du barrage de Boughzoul, mieux encore elle nous a permis de pointer du doigt la zone potentiellement productive de sédiments à savoir toute la superficie comprise entre la rive droite en remontant vers le barrage de colonel Bougara et la limite nord du bassin (Figure 4.21)

Par ailleurs l'apport solide de Nahr Ouassel au droit de la station C.Bougara reste sans effet notable dans l'avenir sur l'envasement du barrage de Boughzoul en raison des deux barrages réalisés sur le même cours d'eau à savoir Dahmouni et Colonel Bougara qui réussissent à piéger la quasi-totalité des sédiments produits en amont.

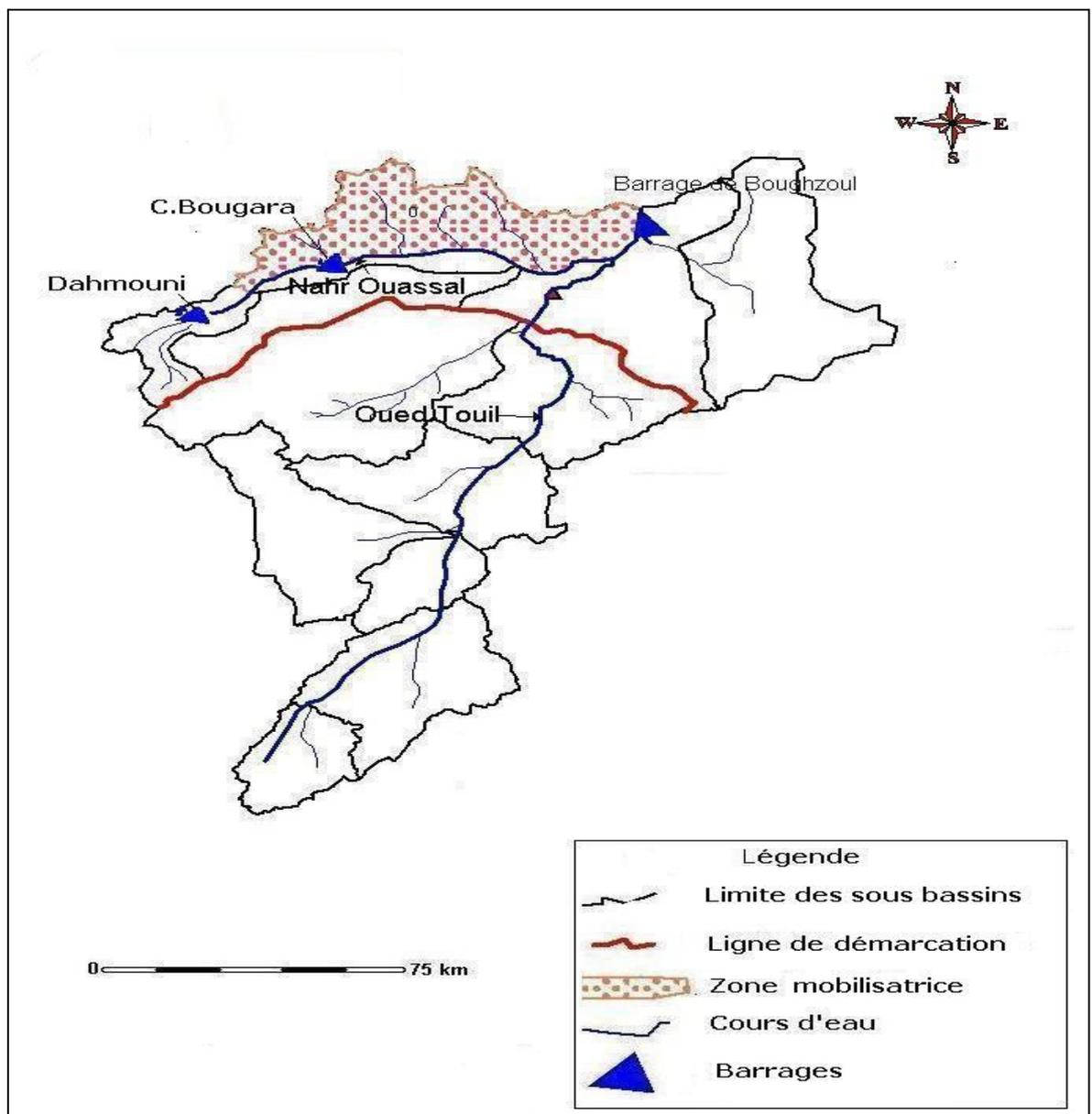


Figure 4.21 Zone mobilisatrice de sédiments

CHAPITRE 5

LUTTE PREVENTIVE

5.1 Introduction

Afin de lutter contre l'érosion et le transport solide en Algérie, des moyens importants ont été consentis entre 1940 et 1977 pour revégétaliser l'amont des bassins versants, stabiliser les ravines, restaurer la productivité des terres et protéger les barrages de l'envasement : c'est la stratégie de défense et restauration des sols (DRS).

Malgré 40 années de DRS, les terres continuent à se dégrader et la production de céréales à diminuer, l'érosion à se développer et les barrages à s'envaser rapidement; les paysans qui ont perdu de 5 à 15% de S.A.U n'ont pas vu leurs rendements améliorés.

En effet la lutte par les banquettes, considérée comme technique sûre ayant fait ses preuves aux U.S.A n'a pas eu le même mérite en Algérie faute d'adaptation au milieu. Il s'agit en fait de 80% de surfaces aménagées en banquettes dont 20% sont effacées par les labours, 30% sont détruits par ravinement /glissement, 30% n'ont jamais été entretenues et sont en mauvais état et seulement 20% sont en bon état, mais on peut se demander si elles ont fonctionné. [16]

Parmi les causes du rejet de cette technique figurent surtout le sentiment d'expropriation des terres, les pertes de surface et dans une moindre mesure une entrave à la liberté de circulation des riverains. La réaction des fellahs est de s'opposer énergiquement à l'implantation des aménagements (42%) sur leurs terres et refusent de les entretenir (65%). A ce sentiment de frustration s'ajoute l'indifférence totale d'où le délaissement et l'abandon des aménagements. Une autre raison du refus provient du système d'élevage errant : le pâturage libre et la vaine pâture sont incompatibles avec la création de vergers sur les talus des banquettes [16].

Il est évident que le plus ambitieux des programmes antiérosifs ne peut porter ses fruits que si les deux conditions suivantes soient réunies :

- Opter pour des techniques faciles à mettre en oeuvre, conciliant le coût et l'efficacité.
- Sensibiliser la communauté paysanne pour prendre part dans les programmes de lutte moyennant des mesures incitatives.

5.2 Mesures biologiques

- Les boisements denses avec des espèces bien adaptées offrent la meilleure protection des bassins versants
- Le semis de légumineuses et de graminées améliore la structure des sols et assure une couverture végétale permanente, ce qui a pour effet de diminuer la battance et empêche la concentration des écoulements.
- La limitation de la charge (tête /ha) et la stricte observation des périodes de repos propre à chaque type phyto-sociologique de parcours permettent à la phytomasse de se régénérer et assurer la stabilité des sols avec une meilleure productivité.

5.3 Mesures mécaniques

Le traitement mécanique vise à réduire le débit des écoulements superficiels des eaux de pluie tout en créant des micro-climats favorables au rétablissement de la végétation.

Parmi les techniques expérimentées dans la région on se contente de ce qui suit :

5.3.1 Le disc Pitting

Sur des pentes faibles (0 à 2%) et avec un disc Pitter, on réalise des encoches en quinconce d'environ 80*15*10cm, ces dernières servent à capter les eaux de ruissellement (30 à 40l) et les graines.

5.3.2 Les sillons de niveaux continus

Sur les pentes de 2 à 5% des bourrelets anti-érosifs parallèlement aux courbes de niveau avec des intervalles de 2 à 4 m permettent de contenir les eaux de ruissellement et peuvent servir de couches de semis ou de plantation d'arbustes fourragers.

5.3.3 Les sillons de niveaux en quinconce

Sur les pentes de 5 à 10% ou l'écoulement des eaux de surfaces après de forts orages ne pourrait être soutenu que par d'énormes banquettes, les sillons en quinconce permettent de réduire la force de l'écoulement, tout en favorisant l'absorption in situ et l'établissement d'une végétation.

5.3.4 Les seuils

Les seuils présentent une efficacité remarquable face aux crues en effet les seuils brisent l'énergie de ces dernières ce qui réduit leur pouvoir de transport et augmente leur temps de concentration.

Les atterrissements derrière les seuils se colonisent rapidement par la végétation ce qui participe à la stabilisation du sol et contribue dans la lutte biologique.

Parmi les seuils expérimentés dans la zone d'étude et qui ont donné des résultats satisfaisants avec un rapport prix / efficacité très intéressant (Tableau 5.1) [17], on cite :

5.3.4.1 Seuil en gabions

Ce sont des barrages érigés en milieu des ravines à profil triangulaire et peuvent aussi être utilisés comme mur de soutènement pour consolider les parois des berges. Leur coût est très élevé car il faut apporter dans des zones difficiles d'accès les pierres dans le cadre en grillage et le poser sur un lit de graviers. (Photo 5.1) [17]

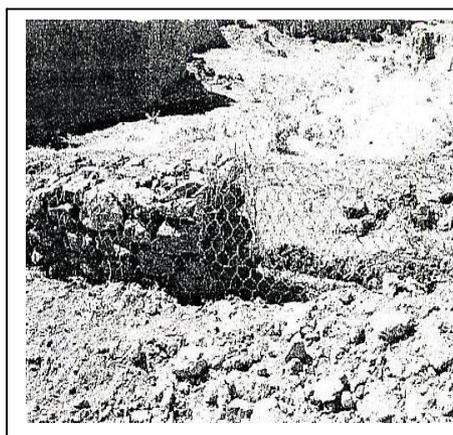


Photo 5.1 Seuil en gabions

5.3.4.2 Seuil en pierres sèches

Le seuil en pierres sèches dont les caractéristiques sont proches du seuil gabion est largement répandu en Algérie, leur réussite dépend avant tout de la qualité des pierres utilisées (Photos 5.2.3) [17]. Ils n'exigent ni ferrailage ni ciment, mais la récolte des pierres et le montage du mur nécessitent beaucoup de temps et une main d'œuvre qualifiée. Le coût n'est réduit que de 20% par rapport aux gabions.



Photo 5.2 Seuil en pierres sèches (ravine en U)

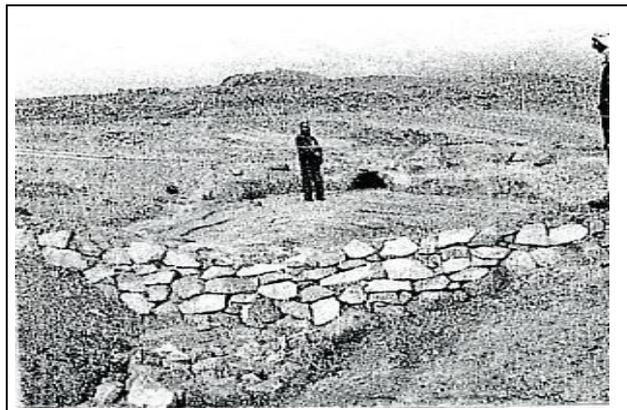


Photo 5.3 Seuil en pierres sèches (ravine en V)

5.3.4.3 Seuil à Grillage métallique

De 1 à 3m d'ouverture de maille, fixé sur des pieux en fer cornière de 50 mm de côté et de deux mètres de haut, plantés dans l'altérité tous les 80 cm et reliés par du fil de fer galvanisé de 3 mm (Photos 5.4.5) [17]. En réalité, ces micro-barrages perméables se sont révélés très bien adaptés aux conditions des ravines moyennes sur marnes et schistes tendres. Ces seuils sont à la fois très souples face aux pressions des ravines en crues, faciles à transporter et à monter, efficaces même pour piéger les altérites de roches argileuses. Ils ont été les dispositifs les plus résistants durant les crues des averses de fréquence rare. Leur pose est rapide en milieu d'altérites tendres et leur coût ne dépasse pas le quart de celui des gabions. Malheureusement, ils ne sont pas à l'abri du vol par les enfants et les bergers qui ont toujours besoins de grillage.

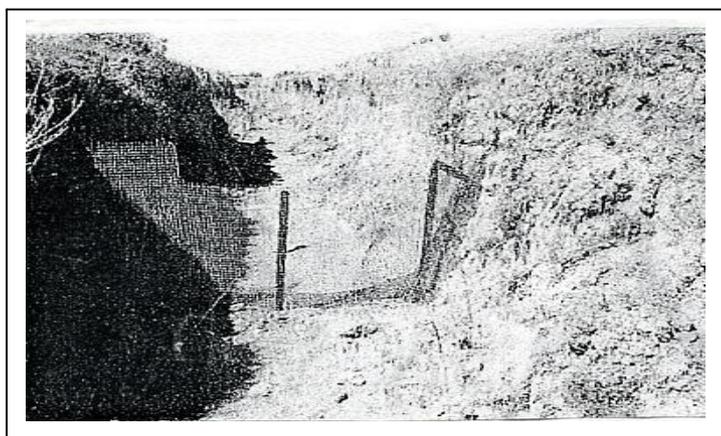


Photo 5.4 Seuil à grillage métallique (Avant)



Photo 5.5 Seuil à grillage métallique (Après)

5.3.4.4 Seuil en sacs plastiques

Il est peu solide à cause de l'usure de la rangée supérieure (vulnérabilité aux rayons ultraviolets et aux objets tranchants), mais efficace, souple et facile à mettre en place. Pour améliorer ses performances, il est essentiel d'utiliser du plastique noir plus résistant au soleil. (Photo 5.6) [17]



Photo 5.6 Seuil en sacs plastiques

5.3.4.5 Seuil en pneus usés

Il est peu solide à cause de sa faible densité, mais résistant si les ligatures sont parfaites, malgré sa souplesse, il n'est pas facile d'adapter l'ouvrage au profil de la ravine comme il n'est pas facile de trouver des pneus de même dimensions dans les petites villes.(Photos 5.7.8) [17]
Même si l'aspect esthétique reste discutable leur prix est intéressant.



Photo 5.7 Seuil en pneus usés (Avant)

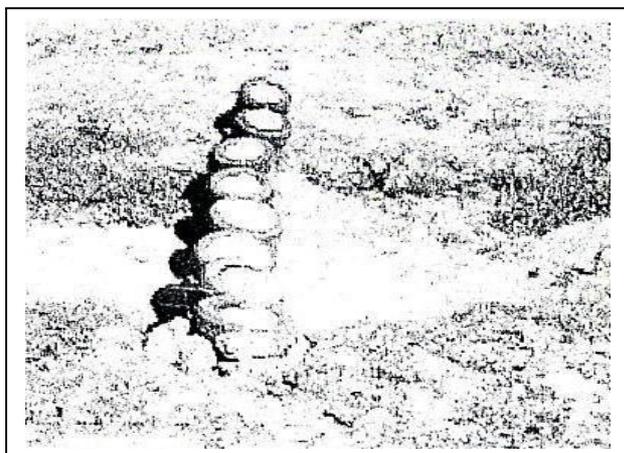


Photo 5.8 Seuil en pneus usés (Après)

5.4 Qualité des seuils

Tableau 5.1 Qualité des seuils testés [17]

Nature du seuil	Efficacité	Coût par rapport au prix gabion m ³ /DA	Recommandations	Observations
Gabions	Maximum		Seuils verrous. Seuls état et collectivité	Longévité très longue
Pierres sèches	Bonne si pierres bien disposées	50 %	Nécessité de pierres de bonne qualité	Attention aux passages des animaux
Grillage Métallique	Elevée avec métal galvanisé	40 %	Zone peu accessible	Attention aux vols
Sacs en plastique	Bonne avec plastique noir tressé, poussée hydrodynamique à craindre	25 %	Zones peu accessibles. Relais végétal à croissance rapide	Plastique dégradable par U.V en deux années seulement
Pneus usés	Bonne, poussée hydrodynamique à craindre	20 %	Recyclage de la matière, esthétique discutable	Longévité très longue

5.5 Conclusion

Le ruissellement prenant naissance à la surface de sols encroûtés par la pluie ou gorgés d'eau, de pente fortes et de couvert végétal insuffisant peut se concentrer et finir par acquérir de l'énergie pour creuser de nouvelles ravines. Il est donc fondamental d'orienter la lutte contre l'érosion d'abord sur les versants pour retarder le ruissellement et étaler les filets d'eau, ensuite aménager les ravines.

Malgré la grande amélioration de la correction torrentielle de ravines, elle reste insuffisante pour réguler les débits de crues qui bien des fois emportent les aménagements bien établis et provoquant de sérieux dégâts en aval.

Les sédiments captés par les seuils risquent d'être remis en suspension et de continuer leur cheminement s'ils ne sont pas fixés rapidement par la végétation. Dans le canal central on choisira d'installer des herbes résistantes à l'immersion en cas de crues et à la sécheresse pendant les périodes chaudes. Il paraît donc judicieux de mener une lutte sélective pour ne pas éparpiller les efforts et combiner les différentes techniques en fonction des données du terrain.

La valorisation des atterrissements par des plantations fruitières rustiques à forte valeur ajoutée (figuiers, amandiers, caroubier, grenadiers, pistachiers), peut générer des revenus complémentaires et inciter les paysans à être partie prenante dans les actions de lutte initiées par l'état.

Un pâturage planifié et bien géré permet aux surfaces pâturées de se régénérer et au sol de s'équilibrer avec un contrôle rigoureux des pratiques humaines (défrichage) susceptibles d'aggraver l'érosion.

Il va de soi que les campagnes de sensibilisation de la population autochtone quant à la gravité du phénomène et aux conséquences parfois irrémédiables, pourraient secouer les consciences et bannir les réticences des uns et des autres pour une implication énergique et sans réserves dans cette lutte qui s'annonce rude mais d'horizon certain.

CONCLUSION

L'étude du transport solide dans le bassin versant Chellif amont de Boughzoul a permis de quantifier les apports liquides et solides détaillés de ses principaux affluents et de localiser la zone potentiellement responsable à hauteur de 80% de l'envasement du barrage de Boughzoul à savoir la partie comprise entre la rive droite de Nahr Ouassel en remontant vers le barrage de Colonel Bougara et la limite nord du bassin. (Figure 4.21)

- Pour la période allant de 1982 à 2006, l'apport liquide moyen annuel enregistré au barrage de Boughzoul est de :

$$\mathbf{Apl = 67.7 \text{ Mm}^3.}$$

- L'apport liquide moyen annuel au barrage de Boughzoul correspondant à la chronique hydrométrique de base (1983/1991) est de :

$$\mathbf{Apl = 44.7 \text{ Mm}^3}$$

- Les observations des stations hydrométriques lacunaires de cette chronique sont doublement confortées à la fois par les mesures limnimétriques et bathymétriques du barrage de Boughzoul et les parfaites corrélations des apports solides et liquides annuels envisagées (Coefficients de détermination > 0.90), ce qui nous a permis de distinguer les contributions effectives de chaque sous bassin versant au niveau du barrage de Boughzoul.

- Les apports moyens annuels nets de oued Touil au barrage de Boughzoul sont:

- $\mathbf{Apl = 20.75 \text{ Mm}^3}$
- $\mathbf{Aps = 108482 \text{ tonnes}}$

- Les pertes annuelles engendrées par la rétention de Nahr Ouassel sont :

- $\mathbf{Pl = 6.75 \text{ Mm}^3}$
- $\mathbf{Ps = 25948.7 \text{ tonnes}}$

- Les apports moyens annuels nets de Nahr Ouassel au barrage de Boughzoul sont :

- $\mathbf{Apl = 23.94 \text{ Mm}^3}$
- $\mathbf{Aps = 459911 \text{ tonnes}}$

- Les apports moyens annuels totaux des sous bassins au barrage de Boughzoul sont :
 - **Apl = 44.7 Mm³**
 - **Aps = 568392.7 tonnes**

➤ L'évaluation de la dégradation spécifique du bassin versant amont de Boughzoul est donnée par :

- Hydrométrie **Ds = 28.9 t/km².an.**
- Bathymétrie **Ds = 34.27 t/km².an**

Par ailleurs et à cause de la perte de capacité annuelle du barrage de Boughzoul engendrée par le transport solide annuel évalué à 0.5 Mm³, sa durée de vie ne saurait dépasser 40 ans concluent les prévisions, portant ainsi l'horizon limite de son exploitation à 2048 à partir de l'année 2008

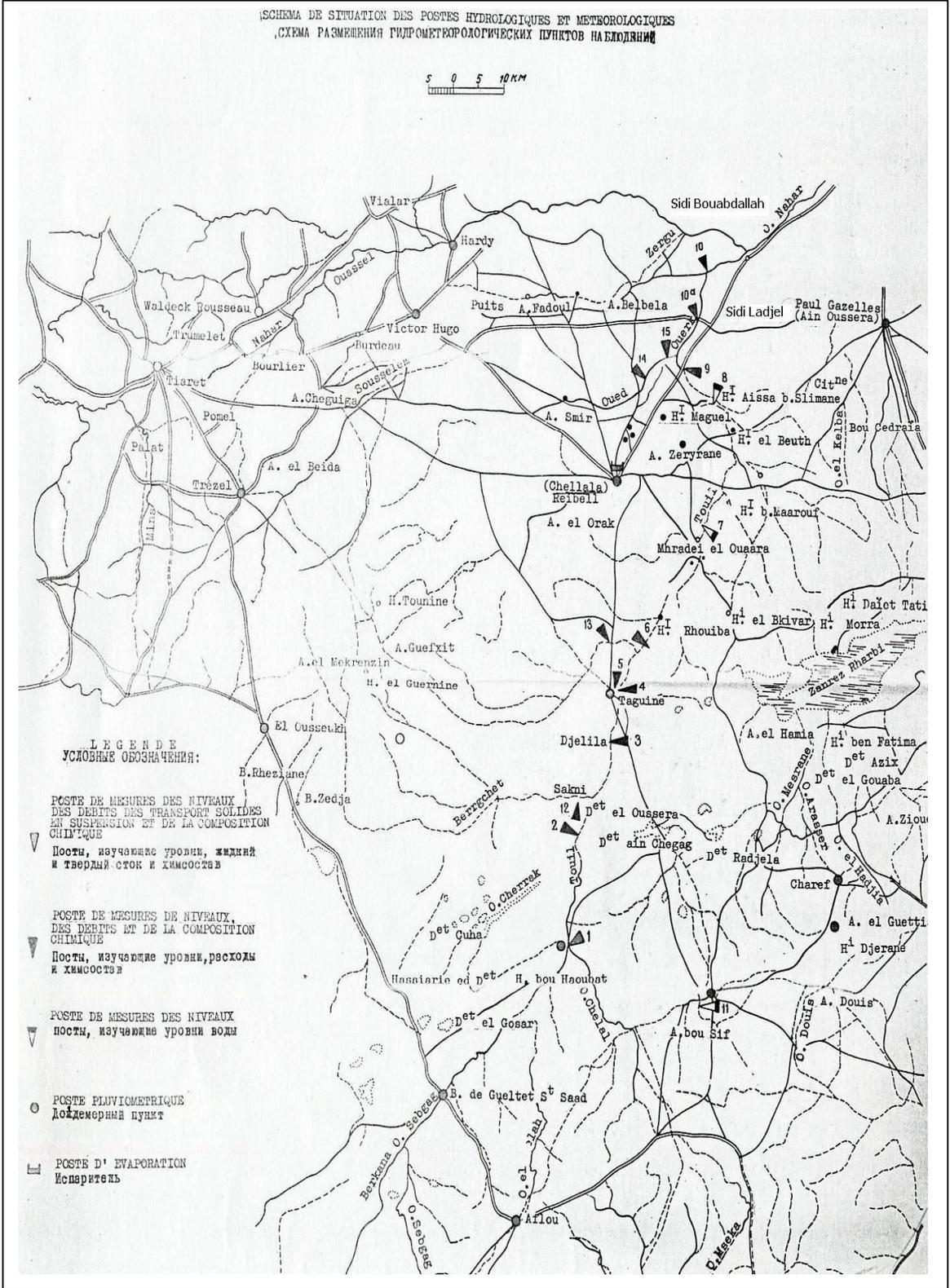
En optant pour une stratégie de lutte contre les causes plutôt qu'aux conséquences telle que préconise l'étude par la combinaison des techniques biologiques et mécaniques, on saura endiguer promptement le phénomène et garantir la longévité souhaitée de cet aménagement vital aussi bien pour la nouvelle ville de Boughzoul que pour la région.

Le travail de proximité et d'assistance reste un levier de grande importance pour la sensibilisation et la mobilisation d'un monde rural refoulant par phobie toute action tendant à bouleverser l'ordre établi et dont le fruit ne convainc que les initiateurs à long terme.

Puisse ce modeste travail contribuer à l'enrichissement des connaissances en inspirant les hommes soucieux de ce phénomène insidieux et sournois qui est le transport solide en incitant les décideurs à prendre les dispositions nécessaires pour vivre en harmonie avec la nature tout en concrétisant les actions de développement envisagées pour le bien être de leur population.

APPENDICE A

Plan de situation des postes pluviométriques et hydrométriques (Etude soviétique)



REFERENCES

1. Hydrodragage-C.T.systems ; "Rapport technique : Levés bathymétriques des barrages en exploitation Barrage Boughzoul wilaya de Médéa", (2005)
2. A.B.H Chellif-Zahrez ; "Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Chellif-Amont de Boughzoul", (2007)
3. Many.J ; "Climatologie et environnement", (1999)
4. Véssojuznojé Objédinérijé des projets hydrauliques ; "Irrigation de 2500 ha de terres et alimentation des localités en eau dans la zone d'irrigation à partir des eaux souterraines dans la wilaya de titteri de la république Algérienne démocratique et populaire" Volume I, (1971)
5. Caratini.C " Etude géologique de la region de Chellala- Reibell", (1970)
6. Remini, Avenard, Kettab "Envasement des barrages" CEDOC, (2003)
7. Gomer.D ; "Ecoulement et érosion dans les petits bassins versants à sol marneux sous climat semi aride méditerranéen", (2006)
8. Hydrodragage-C.T.systems "Rapport technique : Levés bathymétriques des barrages en exploitation Barrage Dahmouni wilaya de Tiaret", (2005)
9. Hydrodragage-C.T.systems "Rapport technique : Levés bathymétriques des barrages en exploitation Barrage Colonel Bougara wilaya de Tissemsilt", (2005)
- 10 Remini.B et Hallouche.W "Prévision de l'envasement des barrages du Maghreb" Larhyss journal n° 4, (Juin 2005)
11. I.N.R.A "L'érosion hydrique des sols en France", (2006)
12. Ramez.P: "Gestion des milieux aquatiques", (1995)
13. Degoutte.G "Diagnostic, aménagement et gestion des rivières", (2006)

14. Bouanani.A “ Hydrologie, transport solide, et modélisation
Etude de quelques bassins de la Tafna (N.W Algérie)”, (1999)
15. SOGREAH “Etude d’avant projet détaillé du barrage colonel
Bougara sur oued Nahr Ouassel”, (1986)
16. Arabi.M, Kedaid.O, Bourougaa.L, Asla.T, Roose.E “Bilan de l’enquête
sur la défense et la restauration des sols (D.R.S) en Algérie”,(2004)
17. Arabi.M “ Annales de géomorphologie”, (2006)
18. Roose, Chebbani, Bourougaa “Ravinement en Algérie”, (2000)
19. Société S.E.G.G.T.H ” Monographie du barrage de Boughzoul”, (1966)
20. BNEIDER “Etude de mise en valeur des potentialités de la commune
rurale de Boughzoul” ; (2002)
21. Sari.A “ Initiation à l’hydrologie de surface”, (2002)
22. Reminéras.G “Hydrologie de l’ingénieur”, (1986)
23. Dubreuil.P “Initiation à l’analyse hydrologique”, (1974)